



## Investigasi tropis PAN tentang bioGeokimia dan Adaptasi Ekologi (PANGEA): Melingkupi Kampanye Lapangan yang Disponsori NASA

**Laporan Akhir-Desember 2024**

### **Penulis Utama**

\* Menunjukkan penulis yang berkoordinasi

Elsa M. Ordway\* (University of California, Los Angeles [UCLA]), Michael Keller\* (United States Forest Service [USFS], Jet Propulsion Laboratory [JPL]), Marcos Longo (Lawrence Berkeley National Laboratory [LBNL]), Robinson Negrón-Juárez (LBNL), Yanlei Feng (Massachusetts Institute of Technology [MIT]), Hannah Stouter (UCLA), Isaac N. Aguilar Rivera (California Institute of Technology [Caltech]), Ane Alencar (Institut Penelitian Lingkungan Amazon [IPAM]), Adia Bey (NASA Goddard Space Flight Center [GSFC], Universitas Maryland [UMD]), Renato K. Braghiere (Caltech, JPL), Anabelle Cardoso (Universitas Buffalo & Universitas Cape Town), Dana Chadwick (JPL), Jose D. Fuentes (Pennsylvania State University [Penn State]), Regina Eckert (JPL), Temilola Fatoyinbo (GSFC), António Ferraz (JPL), Liane Guild (NASA Ames Research Center [ARC]), Matthew Johnson (ARC), Esi Kane (Universitas Energi dan Sumber Daya Alam, Sunyani-Ghana), Lydie-Stella Koutika (Pusat Penelitian Produktivitas dan Keberlanjutan Perkebunan Industri [CRDPI]), Yue Li (UCLA), Junjie Liu (JPL), Ian McCubbin (JPL), Félicien Meunier (Universitas Ghent), Charles Miller (JPL, Caltech), Helene C. Muller-Landau (Smithsonian Tropical Research Institute [STRI]), Teodyl Nkuintchua (World Resources Institute), Matheus Nunes (UMD), Le Bienfaiteur Sagang Takougoum (UCLA), Maria J. Santos (Universitas Zurich), Fabian D. Schneider (Universitas Aarhus), Marc Simard (JPL), Bonaventure Sonké (Universitas Yaounde I), César Terrer (MIT), Marius von Essen (UCLA), Michelle Y. Wong (Universitas Yale), Sarah Worden (JPL), Xiangming Xiao (Universitas Oklahoma [OU]), Virginia Zaunbrecher (UCLA)

### **Penulis yang Berkontribusi**

Marijn Bauters (Universitas Ghent), Pascal Boeckx (Universitas Ghent), Jennifer Bowen (Universitas Stanford), Iniquilipi Chiari (Aliansi Global Komunitas Teritorial [GATC]), Ovidiu Csillik (Universitas Wake Forest), Gloria Diez (GATC), Marcelo Doroso (GATC), Deborah Delgado Pugley (Universitas Katolik Kepausan Peru [PUCP]), Wannes Hubau (Universitas Ghent), Alejandra Echeverri Ochoa (Universitas California, Berkeley), Evan Gora (Institut Studi Ekosistem Cary), Alison Hoyt (Stanford), Juan Carlos Jintiaich (GATC), Victor Maquette (OU), Clarice Perryman (Stanford), Zoe Pierrat (JPL), Leila Saraiva (GATC), Debjani Singh (Oak Ridge National Laboratory [ORNL]), Iroro Tanshi (Universitas Washington & Organisasi Konservasi Mamalia Kecil [SMACON]), Jill Thompson (Pusat Ekologi dan Hidrologi Inggris [UKCEH]), Hans Verbeeck (Universitas Ghent)

## Kata Pengantar

Peluang Penelitian NASA dalam Ilmu Pengetahuan Antariksa dan Bumi yang dirilis pada tahun 2022 meminta proposal untuk melakukan studi pelingkupan untuk mengidentifikasi pertanyaan ilmiah dan mengembangkan desain studi awal serta konsep implementasi untuk kampanye lapangan Ekologi Terrestrial NASA yang baru. Pada musim semi 2023, NASA memilih dua proyek untuk didanai, termasuk proyek yang berjudul: "Studi Cakupan untuk Kampanye Ekologi Terrestrial Tropis NASA" (Hibah NASA 80NSSC23K1019 ke Universitas California, Los Angeles). Laporan ini berisi rekomendasi dari studi pelingkupan ini, yang menyajikan investigasi tropis PAN mengenai bioGeokimia dan Adaptasi Ekologi (PANGEA). NASA menguraikan sepuluh harapan yang akan diidentifikasi untuk setiap studi pelingkupan:

1. Pertanyaan-pertanyaan dan isu-isu sains.
2. Keadaan ilmu pengetahuan saat ini.
3. Potensi untuk kemajuan ilmiah yang besar dan signifikan.
4. Peran sentral dan penting dari penginderaan jarak jauh NASA.
5. Komponen ilmiah yang penting dari penelitian ini dan mengapa kerja sama tim yang terkoordinasi diperlukan dalam pelaksanaannya.
6. Desain studi secara keseluruhan yang mengidentifikasi infrastruktur pengamatan yang diperlukan (misalnya, pengamatan ruang angkasa, udara, dan/atau pengamatan in-situ yang mendukung) dan analisis (misalnya, model, data, dan sistem informasi).
7. Kelayakan proyek yang diusulkan, baik secara teknis maupun logistik.
8. Keterlibatan komunitas penelitian yang lebih luas untuk mencari umpan balik atas ide-ide, untuk menilai minat, dan untuk mendorong keragaman dan inklusi.
9. Keterampilan disiplin ilmu yang dibutuhkan untuk melakukan studi dan melibatkan mitra potensial dalam kegiatan perencanaan mereka.
10. Potensi penggunaan hasil untuk aplikasi dan dukungan keputusan.

Buku putih ini menyajikan 1) dasar pemikiran ilmiah; 2) konsep desain studi awal; 3) presentasi pertanyaan sains, tujuan, dan sasaran; 4) dasar pemikiran dalam hal kecanggihan, relevansi, dan kemajuan yang diharapkan; 5) konsep implementasi; dan 6) informasi lain yang memungkinkan NASA untuk mengevaluasi proyek ini secara menyeluruh. Kami menguraikan konsep PANGEA, termasuk Tema Sains PANGEA (*Bagian 2*), Pertanyaan Sains (*Bagian 3*), kemajuan ilmiah dan teknis yang muncul dari PANGEA (*Bagian 4*), peran penting penginderaan jarak jauh NASA (*Bagian 5*), strategi penelitian dan desain studi PANGEA (*Bagian 6*), prioritas pengembangan kapasitas dan pelatihan PANGEA (*Bagian 7*), strategi pelibatan masyarakat (*Bagian 8*), kemampuan untuk memungkinkan Aksi Bumi (*Bagian 9*), dan kelayakan teknis dan logistik (*Bagian 10*).

PANGEA menawarkan pendekatan modular: Kami telah memilih Domain Inti untuk memprioritaskan pengukuran berbasis darat dan pengamatan udara di wilayah tropis Afrika, yang memiliki kesenjangan data dan pengetahuan yang besar, serta perbandingan dengan Amerika tropis. Kandidat lanskap dalam Domain Inti diidentifikasi di *Bagian 6.2.2*. Kami juga telah memilih Domain yang Diperluas, yang mencakup hutan pantropis di tempat lain, termasuk di Asia dan Australia. Domain yang Diperluas akan menjadi fokus analisis penginderaan jauh satelit dan pemodelan. Batas-batas Extended Domain diidentifikasi di *Bagian 1.4*. Selama proses pelingkupan, tim PANGEA terlibat dengan komunitas mitra potensial yang luas di kedua domain, meminta dan menanggapi umpan balik dari mereka untuk

memastikan bahwa, jika PANGEA terpilih, kami akan dapat berkolaborasi dan berkoordinasi secara efektif dalam upaya-upaya yang sedang berjalan dan yang akan datang (lihat *Lampiran D*).

Konsep PANGEA mencerminkan suara dari banyak pihak dan dikembangkan melalui kolaborasi dengan lebih dari 800 orang yang mewakili lebih dari 300 organisasi dari 42 negara di 5 benua. Lokakarya diselenggarakan di Washington DC, Kamerun, Peru, Brasil, dan Thailand, dengan sekitar 275 peserta langsung dan 298 peserta virtual. Peserta dalam proses pelingkupan mewakili berbagai komunitas, termasuk komunitas akademis di daerah tropis, serta di Amerika Serikat dan Eropa; masyarakat adat dan lokal dari daerah tropis; komunitas NASA dan badan-badan federal Amerika Serikat lainnya; badan-badan antariksa internasional; badan-badan pemerintah asing; organisasi masyarakat sipil; dan industri swasta (lihat *Lampiran C*). Upaya pelingkupan ini menggarisbawahi kebutuhan yang sangat besar terhadap PANGEA dan kesempatan yang tepat waktu untuk berkolaborasi dan berkoordinasi dengan berbagai kegiatan yang sudah ada dan yang akan datang seperti yang diuraikan dalam buku putih ini.

### **Ucapan terima kasih**

Cakupan PANGEA merupakan upaya komunitas internasional. Hal ini tidak akan mungkin terjadi tanpa kontribusi dari banyak individu yang tak terhitung jumlahnya. Kami sangat berterima kasih kepada semua pihak yang telah menyumbangkan ide, waktu, tenaga, sumber daya, dan dana untuk melakukan kampanye lapangan yang sangat dibutuhkan ini. Secara khusus, kami berterima kasih atas dukungan dana dan sumber daya tambahan di luar NASA yang memungkinkan upaya pelingkupan internasional ini. Hal ini termasuk USFS-International Programs, University of California-Los Angeles (UCLA), Governors' Climate and Forests Task Force (GCF-TF), Wildlife Conservation Society (WCS), International Institute for Tropical Agriculture (IITA), Alliance Bioversity International dan CIAT, Center for International Forestry Research and World Agroforestry (CIFOR-ICRAF), Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Universitas Yaoundé I, Universitas Negeri Penn, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Kemitraan Hutan Lembah Sungai Kongo (Congo Basin Forest Partnership/CBFP), Institut Lembah Sungai Kongo (Congo Basin Institute/CBI), Prakarsa Ilmu Pengetahuan Lembah Sungai Kongo (Congo Basin Science Initiative/CBSI), dan Pusat Asia Tenggara NASA SERVIR. Marcos Longo dan Robinson Negrón-Juárez didukung sebagai bagian dari Eksperimen Ekosistem Generasi Berikutnya-Tropis, yang didanai oleh Departemen Energi Amerika Serikat, Kantor Ilmu Pengetahuan, Kantor Penelitian Biologi dan Lingkungan. LBNL dikelola dan dioperasikan oleh Bupati Universitas California di bawah nomor kontrak utama DEAC02-05CH11231.

Banyak staf yang berdedikasi dan pekerja keras yang memungkinkan terselenggaranya berbagai lokakarya dan acara PANGEA, dengan membawa sikap positif dan pemecahan masalah yang memandu PANGEA. Mereka antara lain Isaac Aguilar, Lucia Bolzoni, John Mosinge, Emily Johnson, Michelle Brown, Robert (Bob) Lavoie, Alfonso Villasenor, Cris Silva, Daniel Blackwell, Arlyne Gonzalez, Pilar Anaya Salazar, Karina Castaneda Checa, Martha Gutierrez Fontes, dan masih banyak lagi.

PANGEA juga berhutang budi kepada para peneliti dan praktisi yang telah menyumbangkan ide dan saran mereka dalam kegiatan maraton yang merupakan bagian dari Kampanye Lapangan Ekologi Terrestrial NASA. Secara khusus kami ingin mengucapkan terima kasih kepada Yaxing Wei, Bruce Wilson, dan Michele Thornton (ORNL), Dario Papale (Integrated Carbon Observation System [ICOS]), Gilberto Pastorello (AmeriFlux), Luiz Aragão, dan Bruce Forsberg (LBA), Simon Lewis (Leeds, UCL), Nicolas Barbier (Research Institute for Development, Prancis [IRD]), Pascal Boeckx, Marijn Bauters, Wannes Hubau (Ghent), Denis Sonwa (CIFOR-ICRAF → World Resources Institute [WRI]), dan Stuart

Davies (Smithsonian). Para penulis utama sangat berterima kasih kepada Dr. Jill Thompson (UKCEH) atas komentarnya yang menyeluruh, ekstensif, dan mendalam. Dokumen kami menjadi jauh lebih baik berkat upayanya. Selain itu, kami juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh anggota enam kelompok kerja yang tercantum di bawah ini atas kontribusinya dalam diskusi, ide, dan iterasi berbagai elemen dalam buku putih ini.

**Kelompok Kerja Siklus Biogeokimia dan Dinamika Karbon:** Abhishek Chatterjee (JPL), Alfred Ngomanda (Pusat Penelitian Ilmiah dan Teknologi Nasional Gabon), Alysson Bery (Congo Basin Institute), Anne Ola (INRS), Ashley Ballantyne (Universitas Montana), Asmadi Saad (Universitas Jambi), Bassil El Masri (Universitas Negeri Murray), Beisit Luz Puma Vilca (Sylvera), Ben Taylor (Harvard), Bila-Isia Inogwabini (WWF), Carla Restrepo (Universitas Puerto Rico), Chima Iheaturu (Universitas Bern), Corneille Ewango (Cagar Alam Okapi), Danielle Potocek (Spark Climate Solutions), David Lagomasino (Universitas Carolina Timur), Dheeresh Kumar (Universitas Delhi), Doug Morton (NASA Goddard), Ekene Rangel, Elhadi Adam (University of the Witwatersrand), Eric Cosio (PUCP), Farrel Boucka (AGEOS), Fernanda Santos (ORNL), Fiona Soper (McGill), Flavia Durgante (Institut Teknologi Karlsruhe), Francis Manfoumbi (AGEOS), Gerbrand Koren (Universitas Utrecht), Gillian Galford (Universitas Vermont), Gislain MOFACK II (Organisasi Pangan dan Pertanian PBB (FAO)), Gretchen Keppel-Aleks (University of Michigan), Hankui Zhang (SDSU), Hans Verbeeck (Ghent University), Jim Dalling (UIUC), Jingfeng Xiao (UNH), Joe Mohan (UCI), Joshua Fisher (Chapman University), Kate Nelson (McGill University), Krista Anderson-Teixeira (Smithsonian), Laura Duncanson (University of Maryland), Luis Fernandez NGOULA (University of Yaounde), Marcia Macedo (WHRC), Marijn Bauters (Ghent University), Moses Cho (Universitas Pretoria), Na Chen (MIT), Nate McDowell (PNNL), Patrick Namulisa (Columbia), Nick Parazoo (JPL), NIMPA NGUEMO Christiane Guillaîne (Universitas Bamenda), Nohemi Huanca-Nunez (Yale), Norma Salinas (PUCP), Pascal Boeckx (Universitas Ghent), Paul Arellano (NAU), Paulo Brando (Yale), Petya Campbell (Universitas Maryland Baltimore County), Robinson Negron-Juarez (LBNL), Rogelio Corona (UNAM), Rolf Obame (USTM), Ruofei Jia (MIT), Sarah Batterman (Cary Institute), Sparkle Malone (Yale), Steve Kwatcho Kengdo (UC Berkeley), Tana Wood (Dinas Kehutanan USDA), Timothy Filley (Universitas Oklahoma), Tomasso Jucker (University of Bristol), Trevor Cambron (MIT), Vincent Medjibe (USDA Forest Service), Wu Sun (Carnegie Science), Yann Nouvellon (CIRAD), Yoseline Angel (NASA Goddard), Zeli Tan (PNNL)

**Kelompok Kerja Struktur, Fungsi dan Keanekaragaman:** Jesus Aguirre-Gutierrez (Universitas Oxford), Loren Albert (Universitas Negeri Oregon), Luciana Alves (UCLA), Junior Amboko (Universitas Florida Atlantic), Nicolas Barbier (IRD), Stephanie Bohlman (Universitas Florida), Jeanine Cavender-Bares (Harvard), Caroline Chaves Arantes (Universitas Virginia Barat), Moses Cho (Universitas Pretoria), Rogelio O. Corona-Núñez (UNAM), Claudia Coronel Enríquez (Instituto Mora), KC Cushman (ORNL), Stuart Davies (Smithsonian), Laura Duncanson (UMD), Alvaro Duque (Univ. Nacional de Colombia Sede Medellín), Sandra M Duran (Colorado State Univ.), Bassil El Masri (Murray State Univ.), Joshua Fisher (Chapman), Evan Fricke (MIT), Evan Hockridge (Harvard), Miroslav Honzak (ASU), Tommaso Jucker (Universitas Bristol), Matthias Kunz (GFZ Potsdam), Moses Libalah (Univ. Yaounde I), David Luther (George Mason Univ.), Tim Mayer (Univ. of Alabama Huntsville), Paul Moorcroft (Harvard), Doug Morton (GSFC), Luis Fernandez Ngoula (Univ. Yaounde I), Christopher Nytch (Univ. Puerto Rico), Jack Orebaugh (ORNL), Dina Rasquinha (WWF), Nicholas Russo (Harvard), Norma Salinas (PUCP), Arturo Sánchez-Azofeifa (Univ. Alberta), Wu Sun (Carnegie Institution for Science), Jennifer J Swenson (William & Mary), Nathan Swenson (Univ. Notre Dame), Simon Tamungang (Univ. Bamenda), Jill Thompson (UKCEH), Marcelle Johnson (Wageningen), German Vargas (Oregon State Univ.), Rodrigo

Vargas (University of Delaware / Arizona State University), Jiaming Wen (Carnegie Institution for Science), Michael Wimberly (Univ. Oklahoma), Lin Xiong (Univ. Maryland), Xi Yang (Univ. Virginia)

**Kelompok Kerja Umpan Balik dan Interaksi Iklim:** Nate McDowell (PNNL), Chi Chen (Universitas Rutgers), Manuel Lerda (Universitas Virginia), Rogelio O. Corona-Núñez (Facultad de Ciencias, UNAM), Joshua Fisher (Chapman), Daniela Francis Cusack (CSU), Eric Davidson (Universitas Maryland), Luiz A. T. Machado (IFUSP), Maricar Aguilos (NCSU), Sam Rabin (NCAR), Rob Spencer (FSU), Zhuonan Wang (CSU), Isela Jasso (UNAM), William F. Laurance (James Cook Univ.), Leila Constanza Hernandez Rodriguez (LBNL), Susan Laurance (James Cook Univ.), Jingfeng Wang (Georgia Inst. Of Tech.), Gabrielle De Lannoy (KU Leuven), Gerbrand Koren (Utrecht Univ.), Jie Hsu (National Taiwan Univ.), Tomas Ferreira Domingues (Univ. de São Paulo), Carl Norlen (USGS), Jiafu Mao (ORNL), Mingjie Shi (PNNL), Yanlei Feng (MIT), Jonathan Wang (Univ. Utah), Amy Zanne (Univ. Miami), Emmanuel Barde Elisha (ANI Foundation), Evan Gora (Cary Institute), Xiangzhong Luo (National Univ. of Singapore), Marie Brigitte Makuete (MSRI, Kamerun), Landing Mané (OSFAC), Denis Sonwa (WRI), Louis Defo (Univ. Yaounde I), L. Ruby Leung (PNNL), Yoshiaki Hata (Univ. Tokyo), Cynthia Wright (USFS), Eric Bastos Gorgens (Univ. Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri), Manh-Hung Le (GSFC), Debora Regina Roberti (Univ. Federal de Santa Maria), Kevin Njabo (Texas A&M), Victor Aimé Kemeuze (Universitas Ngaoundere), John Adams Katikomo (EDA), Nyong Princely Awazi (Univ. Bamenda, Kamerun), Martin Arthur Meka Zibi II (Univ. Dschang), Peke Koukou Léon c'est la vie (ONG), Donald-I'or Nyame Mbia (Univ. de Yaounde I), Nkemnkeng Francoline Jong (Univ. Bamenda, Kamerun), Vanessa Mavila (Fondation Eboko), Olivier Bosela (IFA Yangambi), Akwayopanga Denis (Pemda Pakwach), Bakeleki Bohin Jean Marie (IRIC), Carmen Loncthi Fobasso (APDD), Apene Derek Aziwoh (African Environmental Network), Cyrille Bienvenu Bediang (IRIC), Susanna B Hecht (UCLA), Jancy Kelly Bounou Matoumouna (Wildlife Conservation Society), Jonathan Tahiri Heri (Universitas Kindu, RDK), Bertrant James Taya Saah (Univ. Yaounde I), Nzanzu Mulimirwa Philémon (Parlemen Pemuda Kongo), Regis Koumba Mouissou (Univ. Arkansas), Amour Macelvi Matoumouene Goma (LBGE), Paul Martial Tene Tayo (Univ. Yaounde I), Nanda Silatsa Serge (STA), Alain Okito (UNEP), Stella Songwe Tikeng (Univ. Yaounde I), Ncangu Bahindwa Benjamin (Univ. Officielle de Bukavu), Sandjo Phallin Romeal (Institut Tinggi Ilmu Lingkungan), Timothy Bonebrake (Univ. Hong Kong), James Okwiri (Inovasi Agribisnis), Matthieu Aksanti Cizungu (UEFA/RDC), Thierry Michel Tene (Universitas Akdeniz), Igor Akendengué Aken (Universitas Omar Bongo), Clovis Nzuta Kengne (Universitas Dschang), Dschang), Essama Essama Mathurin (CERAD), Dolorès Mache (Planet One-Mboa Hub), Emmanuel Kohbe Wanso (BEDD), Vadel Eneckdem Tsopgni (Univ. Yaounde I), Usongo Patience Abaufei (Univ. Buea, Kamerun), Djorwe Enock (Univ. of Yaounde I), Ravinder Sehgal (SFSU), Donato Ndong Ndong Nzang (UNGE), Nguimalet Cyriaque Rufin (Univ. de Bangui), Hubert Yamvu (Programme National de Santé au Travail), Foupouapegnigni Moihamette (Univ. Yaounde I), Amadou Bossiomo Mfela (Soldats pour la Nature), Hugues Irengé Nganiza (Pan African Univ.), Zacharie Mounkene Bounyahre (Univ. de Ngaoundere), Junior Baudoin Woukoué Taffo (Univ. Maroua), Djosebe Azaria (IRAD), Fritz Betchem (IRIC), Alysso Bery (IBAY-SUP), Robert Vancelas Obiang Zogo (Univ. Omar Bongo), Daniel Brice Knko Nkontcheu (Univ. Buea), Eric Fokam (Univ. Buea), Marcel Carité Vaz (Wilkes Univ.), Armand Okende (ULB), Greg Jongsma (Museum New Brunswick), Joost van Haren (Univ. Arizona), Rui Cheng (Univ. Minnesota), Peter Ssimbwa (Muteesa 1 Royal University)

**Kelompok Kerja Sistem Sosial-Ekologi:** Shivani Agarwal (Columbia), Caroline Arantes (West Virginia Univ.), Adia Bey (GSFC), Ana Buchadas (Humboldt), Glenn Bush (Woodwell), Sophia Carodenuto (Univ. of Victoria), Min Chen (Univ. of Wisc - Madison), Oliver Coomes (McGill), Rogelio Corona (UNAM), Deborah Delgado Pugley (PUCP), Fanny Djomkam (IITA), Alejandra Echeverri (UC-Berkeley), Marius

Ekue (Alliance Bioversity & CIAT), Jessica Fayme (Univ. Michigan), Gillian Galford (Univ. of Vermont), Angélica María Gómez (UNC - Chapel Hill), Burak Güneralp (Texas A&M), Chima Iheaturu (Univ. Bern), Marciel Jadith Móstringa Rodríguez (UNALM-Peru), Matthais Kunz (GFZ-Potsdam), Mody Lacour (UC-Irvine), Victor Maqque (OU), Mia Mitchell (LANL), Paulo Murillo (Univ. del Tolima), Florence Palla (OFAC), Johanne Pelletier (CGIAR), Marie Pratzer (Humboldt), Catherine Potvin (McGill), Dina Rasquinha (Univ. of Georgia), Casey Ryan (Univ. of Edinburgh), Asmadi Saad (Universitas Jambi), Evandro Marcos Saidel Ribeiro (USP), Michaela Shope (MSU), Denis Sonwa (WRI), Jocelyne Sze (UAB)

**Kelompok Kerja Pemodelan dan Sintesis Data:** Shivani Agarwal (Universitas Columbia), Rachel Albrecht (Universitas São Paulo, USP), Luciana Alves (UCLA), Andrés Baresch (Universitas Maryland), Ana Bastos (Universitas Leipzig), Carly Batist (Raiforest Connection), Anthony Bloom (JPL), Damien Bonal (INRAE, Université de Lorraine, AgroParisTech, UMR Silva), Santiago Botia (Institut Max Planck untuk Biogeokimia), Na Chen (MIT), Bradley Christoffersen (Universitas Texas Rio Grande Valley), Michael Coe (Woodwell Climate Research Center, WCRC), Matteo Detto (Universitas Princeton), Hannes De Deurwaeder (Universitas Princeton), Michael Dietze (Universitas Boston), Francina Dominguez (University of Illinois Urbana-Champaign, UIUC), Christopher Doughty (Northern Arizona University), Kim Ely (LBNL), Jianing Fang (Columbia University), Rosie Fisher (Centre for International Climate and Environmental Research Oslo, CICERO), Saulo Freitas (Institut Nasional Brasil untuk Penelitian Antariksa [INPE]), Pierre Gentine (Columbia University), Viola Heinrich (Helmholtz Center Potsdam), Marina Hirota (Universitas Federal Santa Catarina), Forrest Hoffman (ORNL), Jennifer Holm (LBNL), Ruofei Jia (MIT), Trevor Keenan (University of California, Berkeley), Nancy Kiang (NASA GISS), Charles Koven (LBNL), Jennifer Kowalczyk (LBNL), Jeremy Lichstein (University of Florida), Yanlan Liu (Ohio State University), Nima Madani (JPL), Landing Mané (Central Africa Forest Satellite Observatory), Isabelle Maréchaux (INRAE, AMAP), Bassil El Masri (Murray State University), Guilherme Gerhardt Mazzochini (Federal University of Rio de Janeiro, UFRJ), David Medvigy (Universitas Notre Dame), Leila Mirzagholi (MIT), Gislain Il Mofack (Universitas Yaoundé I), Paul Moorcroft (Universitas Harvard), Neil-Yohan Musadji (Universitas Sains dan Teknologi Masuku), Jessica Needham (LBNL), Christiane Guillaime Nimpa Nguemo (Universitas Bamenda), Rogelio Omar Corona Núñez (Universitas Otonomi Nasional Meksiko, UNAM), Rolf Mabicka Obame (Universitas Sains dan Teknologi Masuku), Grace Jopaul Loubota Panzou (Universitas Denis Sassou Nguesso), Gilberto Pastorello (LBNL), Mateus Dantas de Paula (Senckenberg - Leibniz Institution for Biodiversity and Earth System Research), Arthur Prudêncio de Araujo Pereira (Federal University of Ceará), Thomas Pugh (Lund University), Celso von Randow (INPE), Natalia Restrepo-Coupe (University of Arizona, Cupoazu LLC), Evandro Marcos Saidel Ribeiro (USP), Bianca Fazio Rius (University of Campinas, Pusat Penelitian Keanekaragaman Hayati dan Lingkungan), Leila Hernandez Rodriguez (LBNL), Iris Roitman (Universitas Brasília), Sergio Rojas (Humboldt Institute), Thai Rosan (Universitas Exeter), Lina María Sánchez-Clavijo (Humboldt Institute), André Santos (LBNL), Rosa Maria Nascimento dos Santos (Universitas Negara Bagian Amazonas; in memoriam), Shawn Serbin (NASA/GSFC), Alexander Shenkin (Northern Arizona University), Alexey Shiklomanov (NASA/GSFC), Jacquelyn Shuman (NASA Ames Research Center), Anna Spiers (LBNL), Ying Sun (Cornell University), Abigail Swann (University of Washington), Anna Trugman (University of California, Santa Barbara), María Uriarte (Columbia University), María del Rosario Uribe-Diosa (Climate Focus), Rodrigo Vargas (University of Delaware / Arizona State University), Hans Verbeeck (Universitas Ghent), Marco Visser (Universitas Leiden), Weile Wang (Pusat Penelitian NASA Ames), Rachel Ward (Universitas California, Berkeley), Mathew Williams (Universitas Edinburgh), Chonggang Xu (Los Alamos National Laboratory, LANL), Xiangtao Xu (Cornell University), Julia Yang (University of California, Berkeley), Jevan Yu (MIT), Maurício Rumenos Guidetti Zagatto (USP), Wenli Zhao (Columbia University)

**Kelompok Kerja Keterlibatan Masyarakat dan Aplikasi Penelitian:** Yoseline Angel (GSFC), Shivani Argawal (Universitas Columbia), Kemen Austin (WCS), Carly Batist (Raiforest Connection), Ruksan Bose (IITA), Glenn Bush (Woodwell), Rogelio O. Corona-Núñez (Universitas Otonomi Nasional Meksiko, UNAM), Fanny Djomkam (IITA), Marius Ekué (Bioversity), Matt Hansen (UMD), Simon Hoyte (UCL), Nohemi Huanca-Nunez (Yale), Chima Iheaturu (Univ. Bern), Yovita Ivanova (Alliance Bioversity & CIAT), Gerbrand Koren (Utrecht University), Matthias Kunz (Helmholtz Centre Potsdam), Patrick Meyfroidt (Université catholique de Louvain), Catherine Nakalembe (UMD), Tatiana Nana (UMD), Christiane Guillaime Nimpa Nguemo (Universitas Bamenda), Kevin Njabo (Texas A&M), danM), Carl Norlen (USGS), Florence Palla (OFAC), Catherine Potvin (McGill), Danielle Rappaport (UMD), Nick Russo (Harvard), Denis Sonwa (WRI), Hannah Stouter (UCLA), Lucie Félicité Temgoua (Universitas Dschang), Stella Songwe Tikeng (Universitas Yaounde I), Yaounde I), Beisit Luz Puma Vilca (Sylvera)

# Daftar Isi

1	Pengantar dan Motivasi .....	1
1.1	Gambaran Umum Tema, Pertanyaan, dan Tujuan Sains .....	11
1.2	Kebutuhan Mendesak akan PANGEA.....	14
1.3	Peran Pengamatan Penginderaan Jauh .....	15
1.4	Perlunya Pengumpulan Data dan Kerja Sama Tim yang Terkoordinasi.....	16
1.5	Kampanye Lapangan Ekologi Terestrial PANGEA dan Domain Studi.....	18
1.6	Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi .....	23
2	Tema Sains PANGEA .....	23
2.1	Siklus Biogeokimia.....	24
2.2	Keanekaragaman hayati .....	28
2.3	Interaksi dan Umpan Balik Iklim.....	33
2.4	Sistem Sosial-Ekologi .....	36
2.5	Dinamika Gangguan.....	40
3	Kesenjangan Pengetahuan dan Pertanyaan .....	43
3.1	Pola .....	44
3.1.1	Pola: Stok Karbon dan Fluks.....	44
3.1.2	Pola: Keanekaragaman Hayati dan Komposisi Fungsional.....	46
3.1.3	Pola: Interaksi dan Ambang Batas Tanah-Atmosfer .....	48
3.2	Proses .....	49
3.2.1	Proses: Interaksi dan Ketahanan Spesies .....	49
3.2.2	Proses: Umpan Balik Fungsi Gangguan-Ekosistem.....	51
3.2.3	Proses: Dinamika dan Manajemen Pemulihan .....	53
3.2.4	Proses Umpan Balik Siklus Hidrologi.....	54
3.3	Proyeksi.....	56
3.3.1	Proyeksi: Siklus Karbon, Air, Energi, dan Nutrisi.....	56
3.3.2	Proyeksi: Ketahanan Hutan Heterogen .....	57
4	Kemajuan Ilmiah dan Teknis dari PANGEA .....	59
5	Peran Penting Penginderaan Jauh NASA.....	61
6	Strategi Penelitian dan Desain Studi .....	62
6.1	Pendekatan Studi Keseluruhan .....	63
6.1.1	Strategi PANGEA untuk Meningkatkan Skala Ilmu Pengetahuan .....	63
6.1.2	Jadwal Proyek Notional .....	66
6.2	Komponen Ilmiah Penting .....	67

6.2.1	Strategi Dasar, Ambang Batas, dan Cakupan .....	68
6.2.2	Kandidat Lanskap .....	73
6.2.3	Pengamatan Penginderaan Jauh Satelit .....	74
6.2.4	Pengamatan Penginderaan Jauh dari Udara .....	76
6.2.5	Observasi dan Studi Lapangan .....	78
<b>6.3</b>	<b>Pemodelan, Sintesis Data, dan Analisis Integratif .....</b>	<b>82</b>
6.3.1	Pendekatan Pemodelan dan Integrasi Data.....	82
6.3.2	Koordinasi dengan Komunitas Pemodelan dan Integrasi Data Lainnya .....	87
6.3.3	Kegiatan Pemodelan dan Integrasi Data.....	89
<b>7</b>	<b>Pengembangan Kapasitas, Pelatihan, dan Pendidikan .....</b>	<b>90</b>
7.1	Pengembangan Tenaga Kerja .....	90
7.2	Mendidik Sekelompok Mahasiswa Pascasarjana .....	91
<b>8</b>	<b>Strategi Keterlibatan Masyarakat .....</b>	<b>93</b>
8.1	Pengembangan Bersama dan Mitra PANGEA.....	95
8.2	Strategi Keterlibatan.....	96
<b>9</b>	<b>Mengaktifkan Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Bertindak .....</b>	<b>97</b>
<b>9.1</b>	<b>Aplikasi Hasil Penelitian PANGEA .....</b>	<b>98</b>
9.1.1	Stabilitas Penyerapan Karbon dan Fluks Metana .....	98
9.1.2	Konservasi Keanekaragaman Hayati.....	100
9.1.3	Pertanian dan Mata Pencarian Berkelanjutan .....	102
<b>9.2</b>	<b>Proses untuk Memungkinkan Ilmu Pengetahuan Bumi Beraksi .....</b>	<b>104</b>
9.2.1	Keterlibatan Pengguna .....	104
9.2.2	Aplikasi Pendukung Penelitian PANGEA .....	105
<b>10</b>	<b>Kelayakan Teknis dan Logistik .....</b>	<b>108</b>
<b>10.1</b>	<b>Organisasi dan Manajemen .....</b>	<b>109</b>
10.1.1	Manajemen Program.....	109
10.1.2	Kantor Proyek.....	110
10.1.3	Definisi Sains.....	110
10.1.4	Implementasi Proyek.....	111
10.1.5	Tim Sains dan Kepemimpinan Sains.....	111
10.1.6	Diperlukan Keterampilan Disiplin .....	113
<b>10.2</b>	<b>Peluang Pendanaan Bersama .....</b>	<b>114</b>
<b>10.3</b>	<b>Pengelolaan dan Pembagian Data Ilmu Pengetahuan Terbuka .....</b>	<b>115</b>
<b>10.4</b>	<b>Jadwal .....</b>	<b>119</b>
<b>10.5</b>	<b>Penilaian Risiko .....</b>	<b>120</b>
<b>11</b>	<b>Kredit Gambar.....</b>	<b>122</b>

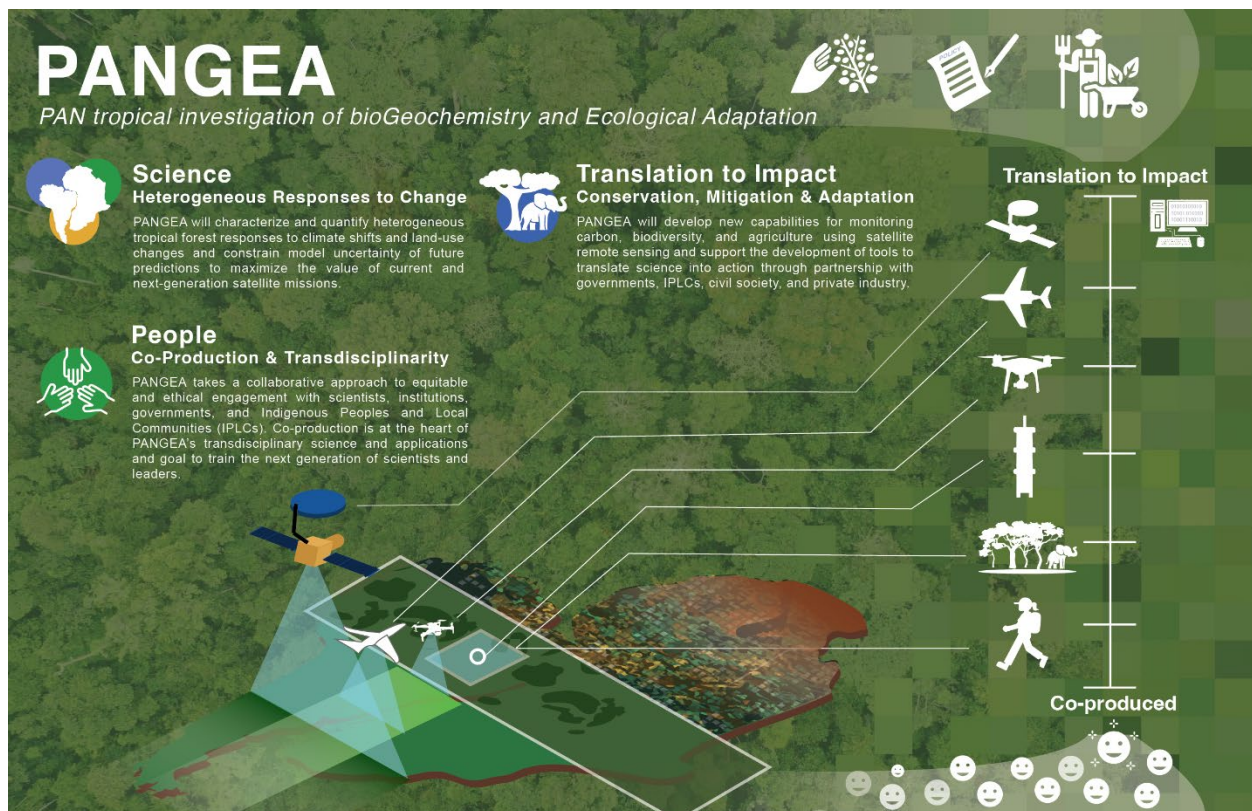
12 Daftar Istilah.....	123
13 Akronim dan Singkatan.....	126
14 Lampiran .....	136
A. Surat Dukungan.....	136
B. Mitra & Kegiatan Keterlibatan PANGEA .....	136
C. Keterlibatan Selama Studi Pelingkupan.....	136
D. Kegiatan Penelitian dan Pemantauan yang Direncanakan dan Sedang Berlangsung .....	136
E. Tabel Pengukuran PANGEA Terperinci.....	136
F. Tanggapan terhadap Umpan Balik .....	136
G. Topik di luar Lingkup PANGEA .....	136

# 1 Pengantar dan Motivasi

**PANGEA merupakan proyek kolaboratif dan transformatif global yang akan menentukan apakah hutan tropis di berbagai benua merespons secara berbeda terhadap perubahan iklim dan penggunaan lahan.**

**PANGEA sangat dibutuhkan untuk**

1. *Memaksimalkan nilai misi satelit saat ini dan generasi berikutnya dengan mengisi kesenjangan data dan mengintegrasikan wawasan ekologi mekanistik.*
2. *Menjembatani kesenjangan pengetahuan yang kritis untuk mendukung tujuan iklim dan keanekaragaman hayati global berdasarkan pemahaman tentang proses yang mengendalikan heterogenitas kerentanan hutan tropis.*
3. *Mengembangkan kemampuan baru untuk mengamati, memprediksi, dan memantau respons hutan tropis, sambil mendorong pembentukan generasi ilmuwan dan pemimpin global berikutnya.*



Hutan tropis memiliki dampak yang luas, mencakup jumlah karbon, nutrisi dan air yang signifikan secara global, aliran karbon dan energi, serta proporsi terbesar keanekaragaman hayati di bumi. Lebih dari 75% tanaman berbunga, amfibi, mamalia darat, ikan air tawar dan laut, serta 91% burung darat di Bumi memiliki wilayah jelajah yang melintasi garis lintang tropis (Barlow et al., 2018). Hutan tropis menyimpan karbon dalam jumlah besar dalam tanah dan biomassa, dengan hutan tropis lembap yang terdiri dari sekitar 40% biomassa tanaman global (Xu et al., 2021a). Sebagai penyerap karbon terbesar di antara semua hutan di dunia (Pan et al., 2024), hutan tropis memainkan peran penting dalam memitigasi peningkatan karbon dioksida di atmosfer ( $\text{CO}_2$ ) dan berperan sebagai penyangga yang sangat penting dalam menghadapi perubahan iklim. Hutan tropis juga berperan

dalam memitigasi peningkatan suhu global melalui pendinginan evaporasi (Bonan, 2008; Artaxo et al., 2022). Selain itu, hutan tropis berinteraksi dengan atmosfer melalui umpan balik yang kompleks yang mengatur cuaca lokal dan iklim regional dan global. Hutan tropis pada akhirnya mempengaruhi seluruh sistem bumi. Sebagai contoh, deforestasi hutan Amazon mengancam pola curah hujan di Amerika Serikat, yang berpotensi mengurangi curah hujan di wilayah Midwest dan Northwest (Lawrence & Vandecar, 2015) dan menyebabkan penurunan salju di Sierra Nevada, California, sebesar 50%, yang menopang pertanian dan kebutuhan air di perkotaan (Medvigy dkk., 2013). Perubahan tersebut dapat mengubah ketersediaan air, mengurangi hasil panen, dan mengganggu kestabilan ekosistem, sehingga menimbulkan risiko terhadap ketahanan pangan dan stabilitas masyarakat. Selain itu, banyak komoditas penting secara global seperti kopi, minyak kelapa sawit, kakao, dan kayu berasal dari daerah tropis, yang menopang pasar global dan rantai pasokan sekaligus berkontribusi terhadap kebutuhan dasar rumah tangga AS.

**Hutan tropis sedang mengalami perubahan yang cepat.** Kawasan hutan ekuator akan segera mengalami suhu tertinggi sejak zaman Eosen, yang jika dikombinasikan dengan perubahan tata guna lahan, akan menyebabkan meningkatnya kekeringan atmosfer dan tekanan air (Barkhordarian dkk., 2019; Ukkola dkk., 2020). Tingkat kematian pohon meningkat di seluruh wilayah tropis karena meningkatnya durasi dan tingkat keparahan kekeringan, serta intensitas badai (Allen dkk., 2010; Choat dkk., 2012; McDowell dkk., 2018; Urquiza-Munoz dkk., 2024). Kenaikan suhu mendekati batas termal yang dihipotesiskan untuk fungsi daun, meskipun batas-batas ini masih diperdebatkan (Smith dkk., 2020; Doughty dkk., 2023; Winter dan Roelfsema, 2024). Dalam beberapa dekade terakhir, sistem sosial-ekologi yang berubah dengan cepat telah menyebabkan perubahan penggunaan lahan antropogenik yang belum pernah terjadi sebelumnya (DeFries dkk., 2004; Hosonuma dkk., 2012; Hansen dkk., 2020; Pendrill dkk., 2022), yang secara langsung berkontribusi terhadap perubahan iklim di wilayah tropis (Smith dkk., 2023). Akibatnya, Amazon bagian tenggara menjadi sumber karbon ke atmosfer (Gatti et al., 2021).

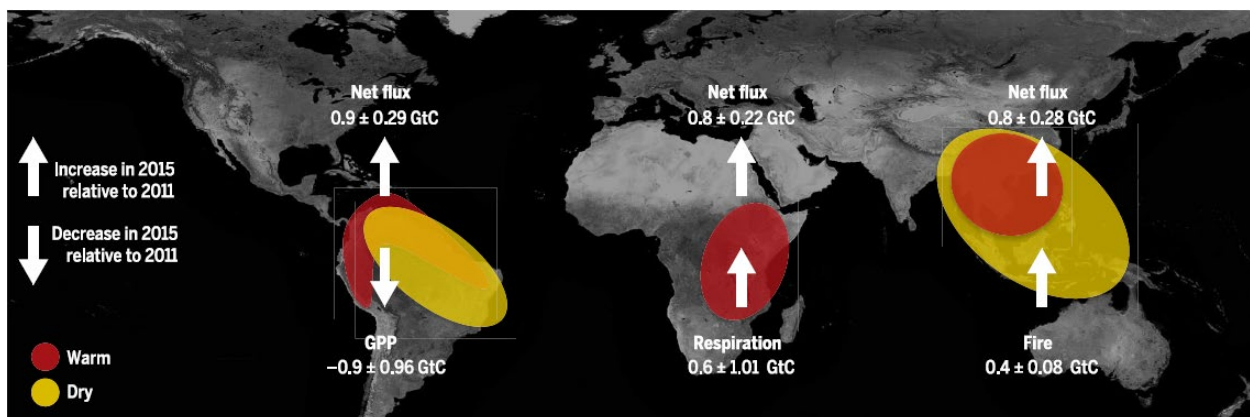
**Deforestasi dan degradasi hutan tropis menyumbang 22% dari emisi CO<sub>2</sub> antropogenik tahunan dari tahun 1990 hingga 2020** (Pan dkk., 2024), meskipun emisi ini sebagian diimbangi dengan penanaman kembali hutan tropis sekunder (Aragão dkk., 2014; Rosan dkk., 2024). Kondisi panas dan kering yang berkepanjangan meningkatkan kerentanan hutan terhadap kebakaran, dan hutan yang telah terbakar menjadi lebih panas dan kering sehingga menimbulkan umpan balik positif yang disebut sebagai "badai api yang berkumpul" (Brando et al., 2020a). Deforestasi, degradasi hutan, eksploitasi langsung (misalnya, perburuan, pemanenan), dan perubahan iklim telah mengubah dinamika gangguan hutan tropis secara drastis dan kini mengancam kepunahan banyak spesies tropis (Feeley dkk., 2012; Barlow dkk., 2016; Benítez-López dkk., 2017; Alroy 2017; Dirzo dkk., 2014). Hilangnya keanekaragaman hayati ini pada gilirannya dapat membahayakan ketahanan struktur dan fungsi hutan tropis, siklus biogeokimia, dan sistem sosio-ekologi (Bunker et al., 2005; Peres et al., 2016). Bahkan setelah memperhitungkan keanekaragaman spesies yang lebih besar, wilayah tropis mengalami deforestasi dengan laju tertinggi secara global (Dirzo et al., 2014).

**Studi selama 10 tahun terakhir telah mengungkapkan bahwa tren dan variabilitas antar tahun dari pertukaran karbon bioma bersih hutan tropis sangat bervariasi di seluruh benua** (Brienen dkk., 2015; Liu dkk., 2017; Hubau dkk., 2020). Dari tahun 1985 hingga 2015, penyerapan karbon hutan tropis dataran rendah Afrika yang masih utuh yang diukur dalam plot inventarisasi hutan secara efektif konstan, sementara penyerapan karbon di hutan tropis dataran rendah Amazon menurun sepertiga dari tahun 2005 hingga 2015 dibandingkan dengan tahun 1990-an (Hubau dkk., 2020; Brienen dkk.,

2015). Dalam kondisi El Niño selama tahun 2015-2016, Amerika tropis, Afrika, dan Asia untuk sementara waktu menjadi sumber neto emisi CO<sub>2</sub> ke atmosfer (Liu et al., 2017). Namun, kehilangan karbon bersih ini tampaknya didukung oleh mekanisme yang berbeda yang mengindikasikan perbedaan dalam stabilitas penyerap karbon di berbagai benua yang akan membutuhkan pemahaman dan pengelolaan yang spesifik secara regional untuk memitigasi. Sumber-sumber konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer, seperti yang diamati oleh Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2), Greenhouse Gases Observing SATellite (GOSAT), dan Measurements Of Pollution In The Troposphere (MOPITT), menunjukkan bahwa di wilayah Amerika tropis, tingkat fotosintesis yang lebih rendah menyebabkan berkurangnya serapan karbon yang mengubah keseimbangan CO<sub>2</sub> **menjadi** emisi bersih (**Gambar 1**). Di Afrika, peningkatan suhu menyebabkan peningkatan respirasi, yang melebihi manfaat penyerapan hutan tropis Afrika Tengah (Liu et al., 2017). Di Asia, permukaan tanah yang lebih panas dan kering menghasilkan lebih banyak emisi CO<sub>2</sub> dari kebakaran (Liu et al., 2017).

**Banyak hutan tropis memiliki dataran banjir dan diselingi oleh ekosistem lahan basah dan air, yang memainkan peran penting dalam anggaran metana global (CH<sub>4</sub>) serta siklus CO<sub>2</sub>** (Sjögersten dkk., 2014; Peng dkk., 2022). Sistem lahan basah tropis dan air tawar pedalaman menyumbang sebagian besar emisi CH<sub>4</sub> akuatik global alami dan mencapai sekitar 20% dari total anggaran CH<sub>4</sub> global sebesar ~575 Tg CH<sub>4</sub> thn<sup>-1</sup> (Saunois dkk., 2020; Peng dkk., 2022). Sumber CH<sub>4</sub> tropis juga merupakan komponen yang paling tidak pasti dalam anggaran karbon global (Saunois et al., 2020, 2024). Perluasan deforestasi dan degradasi hutan, yang dikombinasikan dengan perubahan iklim, secara signifikan berdampak pada aliran air di daratan, debit sungai, dan kualitas air. Hal ini pada gilirannya memengaruhi siklus biogeokimia; kesesuaian habitat bagi komunitas tanaman, hewan, alga, dan mikroorganisme air tawar; sumber daya air bagi manusia; dan produksi tenaga air (Castello dan Macedo, 2016; Guimberteau dkk., 2017; Taniwaki dkk., 2017; Arias dkk., 2020).

Data dari misi satelit NASA dan kampanye udara, yang divalidasi oleh pengukuran berbasis lapangan, memainkan peran penting dalam memajukan pemahaman tentang bagaimana ekosistem hutan dan keanekaragaman hayati merespons perubahan lingkungan (Cavender-Bares dkk., 2022). **Namun, sebelum data satelit dapat digunakan untuk analisis ilmiah atau penggunaan operasional, pengukuran berbasis lapangan sangat penting untuk mengkalibrasi dan memvalidasi pengamatan**



**Gambar 1.** Analisis data satelit OCO-2, GOSAT, dan MOPITT di atas benua tropis menunjukkan bahwa masing-masing menjadi sumber bersih emisi karbon ke atmosfer sebagai respons terhadap El Nino 2015. Secara kritis, setiap benua menunjukkan jalur regional yang berbeda yang membutuhkan pemahaman yang lebih baik. Diadaptasi dari (Liu et al., 2017).

**satelit. Kelangkaan pengukuran berbasis lapangan dan pengambilan data melalui udara di wilayah tropis telah menyebabkan tantangan yang signifikan dalam meningkatkan produk satelit dan menginterpretasikan temuan ilmiah yang diperoleh dari produk tersebut.** Sebagai contoh, siklus karbon dan air di daerah tropis sangat bergantung pada dinamika kelembaban tanah; namun, pengamatan berbasis darat baru-baru ini mengungkapkan bahwa pengambilan data satelit Soil Moisture Active Passive (SMAP) menunjukkan adanya bias yang kuat pada ekosistem tropis (Cho dkk., 2024). Yang penting, data berbasis lapangan yang sama ini telah memberikan peluang untuk meningkatkan pengambilan data kelembaban tanah SMAP di hutan tropis (Wang et al., 2024). Contoh lain dari kelangkaan pengukuran di daerah tropis adalah kurangnya data validasi berbasis lapangan untuk pengambilan CO<sub>2</sub> di daerah tropis, terutama Afrika tropis, yang telah menyebabkan perdebatan yang sedang berlangsung mengenai besarnya pertukaran biosfer bersih di Afrika tropis (Palmer dkk., 2019; Gaubert dkk., 2023). Demikian pula, terlepas dari kebutuhan mendesak untuk menilai keanekaragaman hayati global dalam skala besar untuk mengevaluasi efektivitas upaya konservasi keanekaragaman hayati, kemampuan pemantauan keanekaragaman hayati melalui penginderaan jauh satelit masih dalam tahap awal.

Mengurangi bias dalam pengambilan data kelembaban tanah dan CO<sub>2</sub> kolom atmosfer serta memajukan kemampuan pengukuran baru yang terkait langsung dengan keanekaragaman hayati (misalnya, keanekaragaman beta pohon kanopi) dan proksi (misalnya, jaringan keanekaragaman) sangat penting untuk memajukan pemahaman tentang siklus air, fluks karbon, keanekaragaman hayati, dan dinamika ekosistem. Memvalidasi pengamatan satelit dan udara dengan pengukuran di darat sangat penting untuk keberhasilan misi pengamatan Bumi NASA, terutama dengan munculnya armada sensor baru dan yang akan datang yang memiliki potensi untuk menangkap multidimensi sistem yang diamati (misalnya, melalui misi NASA-Indian Space Research Organisation SAR [NISAR] dan misi Surface Biology and Geology [SBG]). Pengembangan produk satelit yang lebih akurat, terutama di wilayah tropis yang kurang teramati, secara langsung mendukung misi NASA untuk meningkatkan pemantauan lingkungan global dan memajukan model prediktif.

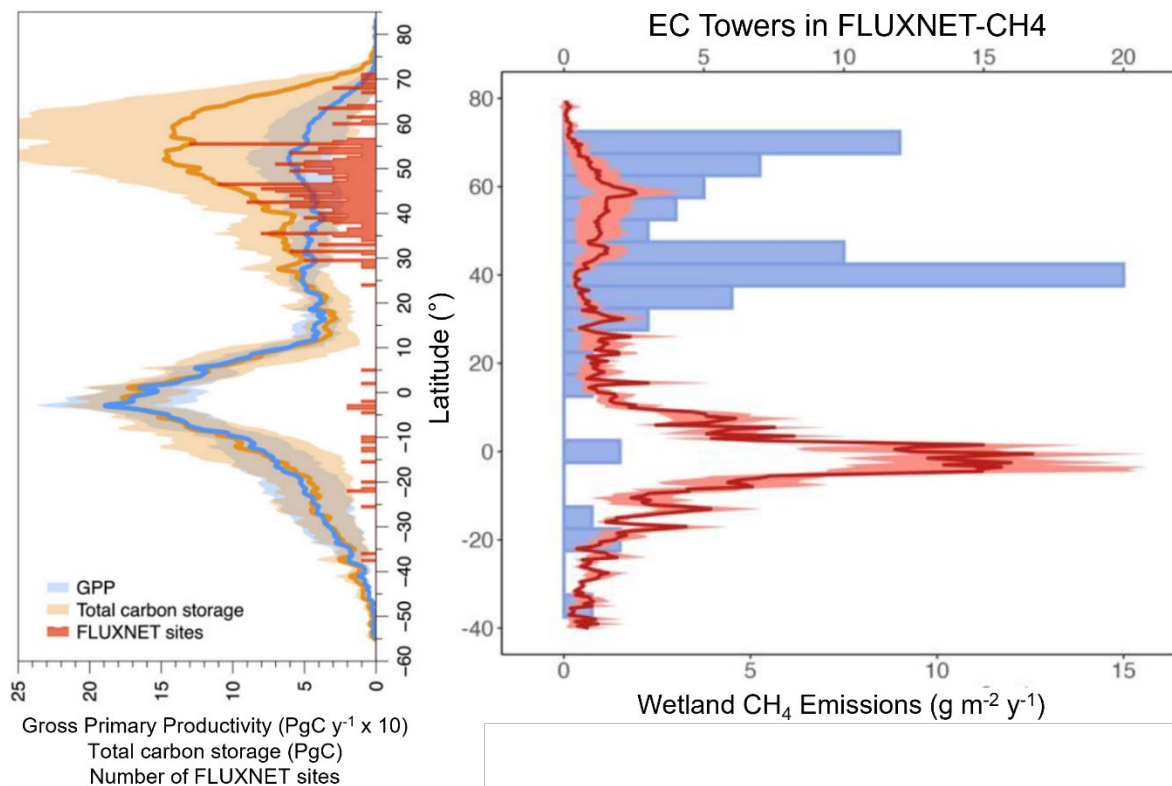
**Hutan tropis adalah yang paling sedikit diteliti dari semua bioma terestrial utama di Bumi.**

**Metode untuk memvalidasi pengamatan satelit dan udara yang digunakan dalam PANGEA mencakup plot inventarisasi hutan, lokasi menara eddy-flux, pengukuran lapangan lainnya, dan Pengetahuan Ekologi Adat, Tradisional, dan Lokal (IEK, TEK, LEK) yang memberikan wawasan berharga mengenai keanekaragaman hayati, dinamika hutan, dan fungsi ekosistem** (mis., ForestPlots.net dkk., 2021; Anderson-Teixeira dkk., 2014, Davies dkk., 2021, Delwiche dkk., 2024). Namun, karena tantangan aksesibilitas dan pendanaan, cakupan pengukuran saat ini di daerah tropis, terutama di Afrika, masih jarang dan jarang mengikuti pola pengambilan sampel secara acak atau sistematis yang diperlukan untuk kekuatan statistik dan bias yang lebih rendah (Goetz dkk., 2015; Bustamante dkk., 2016). Akibatnya, ekstrapolasi dari lokasi plot yang terbatas dapat menimbulkan ketidakpastian dan bias yang signifikan (Saatchi dkk., 2015; Tejada dkk., 2019). Distribusi lintang plot inventarisasi hutan dan menara fluks eddy covariance menunjukkan kurangnya keterwakilan hutan tropis dalam upaya penelitian global, yang menunjukkan bahwa menara dan plot paling sedikit ditemukan di wilayah hutan tropis, meskipun memiliki produktivitas primer bruto dan emisi metana tertinggi dari sumber alami (Baldocchi, 2020, Schimel dkk., 2015) (**Gambar 2**) (**Gambar 2**). Hanya ada satu menara fluks yang ada di seluruh Afrika Tengah (Sibret et al., 2022). Selain itu, kesenjangan data,

metode, dan pengetahuan yang mencolok di daerah tropis saat ini membatasi upaya untuk mengembangkan peta keanekaragaman global dengan menggunakan pengambilan data hiperspektral (misalnya, peta sifat fungsional) (Dechant et al., 2024). Memperluas pengamatan sifat struktural dan fungsional serta metrik fungsi ekosistem di wilayah hutan tropis akan memberikan data kalibrasi dan memungkinkan peningkatan signifikan dalam mengkarakterisasi pola dan proses yang mendorong dinamika hutan tropis yang sangat beragam. Selain model berbasis statistik dan proses, kecerdasan buatan dan teknik pembelajaran mesin telah berkembang pesat dalam dekade terakhir dan kini dapat digunakan untuk mengukur pengukuran berbasis lapangan secara akurat untuk pengamatan udara dan satelit secara regional dan global (Aguirre-Gutiérrez dkk., 2021; Dalagnol dkk., 2022; Lines dkk., 2022).

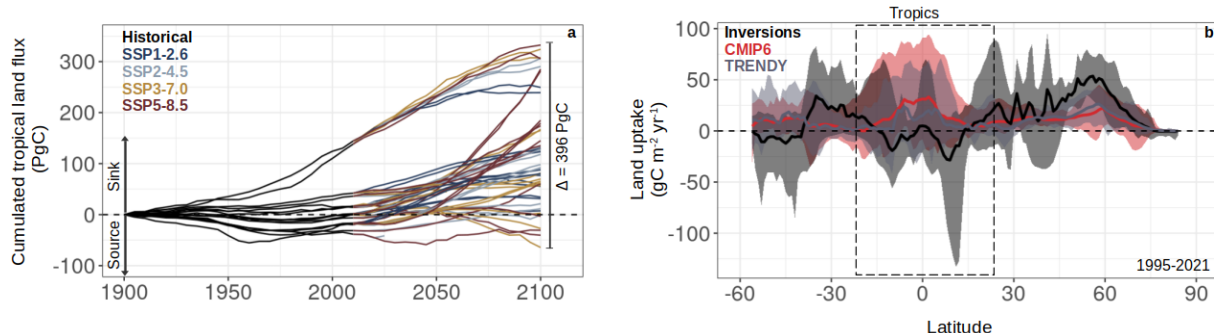
**Data yang langka mengenai dampak keanekaragaman struktural dan fungsional hutan tropis terhadap siklus karbon, air, dan energi membatasi kemampuan kita untuk memahami peran hutan tropis dalam sistem bumi.**

**Prediksi Model Sistem Bumi (Earth System Model, ESM) mengenai fluks karbon memiliki ketidakpastian tiga kali lebih besar di daerah tropis dibandingkan dengan daerah lintang lainnya** (Cavaleri et al., 2015; **Gambar 3**). Produk berbasis penginderaan jauh yang kuat yang menggambarkan siklus karbon, air, dan energi hutan tropis, serta karakterisasi proses yang lebih baik, sangat penting untuk memahami interaksi dan umpan balik antara hutan dan iklim tropis dan membatasi prediksi ESM. Prediksi dari ESM yang berpartisipasi dalam Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) sangat berbeda dalam hal besaran dan kesimpulan apakah lahan merupakan penyerap atau penyimpan karbon (Arora dkk., 2020; Friedlingstein dkk., 2006; Friedlingstein dkk., 2014; Negron-Juarez dkk., 2015). Meskipun pengembangan model antara CMIP - Fase 5 (CMIP5) dan CMIP - Fase 6 (CMIP6) menghasilkan langkah besar untuk membatasi ketidakpastian fluks karbon tropis, pengurangan ini terutama terkait dengan penyertaan batasan nutrisi dalam model (Friedlingstein et al., 2023). Secara tradisional, ESM mengabaikan sebagian besar keanekaragaman hayati dan merepresentasikan vegetasi tropis dengan cara yang sederhana dan teragregasi sehingga tidak menangkap respons hutan tropis terhadap variasi dan gangguan iklim dan berkontribusi pada kegagalan model (Levine dkk., 2016; Yang dkk., 2023; Sakchewski dkk., 2016; Schmitt dkk., 2020).



**Gambar 2. Fungsi hutan** Fungsi hutan mengacu pada peran ekologis hutan, seperti mengatur iklim, mendukung keanekaragaman hayati, siklus nutrisi, dan menyediakan habitat, yang berkontribusi terhadap kesehatan dan stabilitas ekosistem secara keseluruhan. Fungsi hutan meliputi produktivitas primer bruto (GPP), produktivitas kayu, respirasi ekosistem, dan evapotranspirasi. Panel (a) diadaptasi dari Schimel dkk. (2015). Panel (b) oleh Alison Hoyt, Clarice Perryman dan Fa Li.

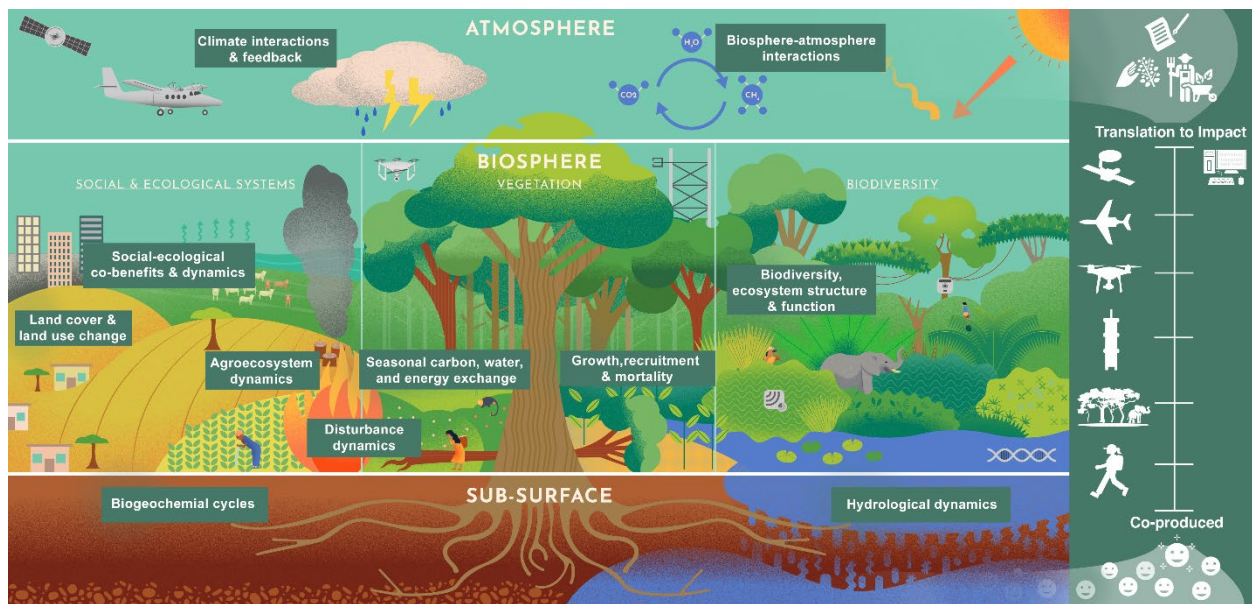
**Untuk mengatasi ketidakpastian ini, diperlukan representasi yang lebih baik dari proses ekologi ekosistem yang beragam** (Bonan et al., 2024). Model biosfer terestrial dan model demografi vegetasi generasi terbaru, seperti Ecosystem Demography Model versi 2 (ED2), Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator (FATES), dan BiomeE, mencakup lebih banyak keragaman kanopi hutan secara struktural dan fungsional (Fisher dkk., 2018; Longo dkk., 2019; Koven dkk., 2020; Weng dkk., 2022). Meskipun model demografi vegetasi merepresentasikan proses dinamika hutan secara lebih langsung, kompleksitas tambahan menciptakan dua tantangan untuk simulasi regional dan global. Pertama, kondisi awal membutuhkan data struktur dan komposisi hutan yang terperinci yang saat ini hanya dapat diperoleh dari plot hutan yang berukuran kecil (Marvin et al., 2014). Kedua, sistem perbandingan model yang ada, seperti International Land Model Benchmarking (ILAMB; Collier dkk., 2018) tidak memadai, karena generasi model yang lebih baru dapat memprediksi sifat agregat yang wajar (misalnya, total biomassa di atas permukaan tanah) dengan mengkompensasi kesalahan dalam representasi proses (misalnya, produktivitas dan kematian yang terlalu tinggi). Kemajuan terbaru dalam penginderaan jauh lidar, radar, dan hiperspektral memberikan peluang unik untuk mengumpulkan data struktur, komposisi, dan keanekaragaman hayati ekosistem tropis pada skala bentang alam dan dengan demikian meningkatkan parameterisasi model, inisialisasi, tolok ukur, dan pengembangan proses (Schimel dkk., 2019; Schimel dan Carroll, 2024).



**Gambar 3.** Fluks karbon lahan kumulatif historis dan masa depan dari daerah tropis menurut model CMIP6 dengan vegetasi dinamis dan beberapa skenario emisi (a). Gambar 4. Rata-rata zonal serapan karbon lahan menurut model inversi (hitam), model CMIP6 dengan model vegetasi dinamis, dan model permukaan lahan TRENDY untuk periode terkini (b). Luasnya wilayah tropis dan ketidakpastiannya yang tinggi ditandai dengan persegi panjang putus-putus. Panel (a) diadaptasi dari Friedlingstein et al., 2014 (pembaruan dari CMIP5 ke CMIP6). Panel (b) digambar ulang dari IPCC AR6 dengan data terbaru.

Untuk menjawab kebutuhan ini dan sebagai tanggapan atas panggilan dari Program Ekologi Terrestrial NASA, berikut ini kami sajikan ruang lingkup proyek lapangan ekologi terestrial, yaitu investigasi tropis PAN mengenai bioGeokimia dan Adaptasi Ekologi (PANGAEA), yang akan memajukan pemahaman mengenai proses-proses yang mengendalikan perubahan di seluruh bioma hutan pantropis dan umpan baliknya yang terintegrasi dengan iklim bumi (**Gambar 4**).

**PANGAEA menerapkan strategi sains-ke-skala, mengambil pendekatan sistem terintegrasi yang mencakup mosaik lanskap yang kompleks yang mencakup hutan hingga lahan basah dan lahan gambut, dan sistem sosial-ekologi pertanian yang utuh hingga yang terganggu.** Transdisiplinaritas dan produksi bersama yang kolaboratif adalah inti dari PANGAEA. PANGAEA akan memastikan kolaborasi yang adil dan transdisipliner di antara para peneliti, pemerintah, lembaga, dan Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal (IPLC) untuk mengintegrasikan beragam keahlian dan pengetahuan. Pendekatan ini akan memungkinkan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran hutan tropis dalam sistem bumi dan akan memberdayakan solusi yang dipandu oleh masyarakat setempat dalam menghadapi perubahan iklim dan hilangnya keanekaragaman hayati. Desain PANGAEA yang tersarang, dengan pendekatan science-to-scale yang dijelaskan secara lebih rinci pada *Bagian 6.1.1*, akan memajukan pemantauan satelit, pengembangan produk penginderaan jarak jauh, dan asimilasi data serta perbandingan berbagai proses dalam model ekosistem generasi mendatang, yang secara signifikan dapat memajukan kemampuan prediksi jangka panjang. Untuk memastikan pengukuran dan analisis yang terkoordinasi, PANGAEA telah dirancang melalui kolaborasi dengan berbagai kegiatan yang selaras saat ini dan yang akan datang, termasuk kampanye dan misi Badan Antariksa Eropa (ESA), Group on Earth Observations-Trees (GEO-TREES), dan One Forest Vision Initiative (OFVi). Pengambilan data penginderaan jauh suborbital (misalnya, dengan drone dan pesawat terbang) merupakan elemen penting dari PANGAEA, yang diperlukan untuk menskalakan antara pengukuran di lapangan dengan pengamatan satelit yang beresolusi lebih rendah. Dalam hal ini, PANGAEA berdiri di atas pundak proyek-proyek lapangan dan udara NASA yang sangat sukses di Afrika dan Amerika, termasuk SAFARI 2000, AfriSAR-1 dan -2, Survei Keanekaragaman Hayati Tanjung (BioSCape), dan beberapa misi Earth Venture Suborbital (EVS).



**Gambar 4. Pengukuran dan penskalaan PANGEA.** PANGEA mengambil pendekatan terpadu dan transdisipliner terhadap ilmu pengetahuan dan aplikasi, dan akan mengumpulkan data dari darat, menara, drone, dan pesawat terbang di bentang alam hutan tropis di Afrika dan Amerika. Pemodelan dan analisis penginderaan jarak jauh satelit akan mengintegrasikan informasi ini untuk memajukan pemahaman tentang hutan secara pantropis.

**Relevansi Aksi Bumi: Implementasi PANGEA akan memberdayakan dan memungkinkan para pengambil keputusan untuk mendapatkan manfaat penuh dari misi satelit Pengamatan Bumi saat ini dan di masa depan untuk mengambil tindakan yang efektif dan disesuaikan secara regional guna mengurangi dampak perubahan iklim dan penggunaan lahan serta melestarikan dan meregenerasi bioma hutan tropis yang penting secara global.** Tujuan PANGEA (*Bagian 1.1*) secara langsung selaras dengan program Aksi Bumi NASA, termasuk Iklim & Ketahanan, Sumber Daya Air, Konservasi Ekologi, dan Pertanian. Untuk mengurangi dampak perubahan iklim dan penggunaan lahan terhadap fungsi ekosistem tropis dan keanekaragaman hayati, serta untuk melestarikan bioma yang penting secara global, tindakan harus diambil. Tindakan ini membutuhkan pemahaman yang lebih baik mengenai beragam cara hutan tropis di berbagai benua merespons perubahan, serta membutuhkan metode dan teknologi mutakhir untuk menerapkan solusi.

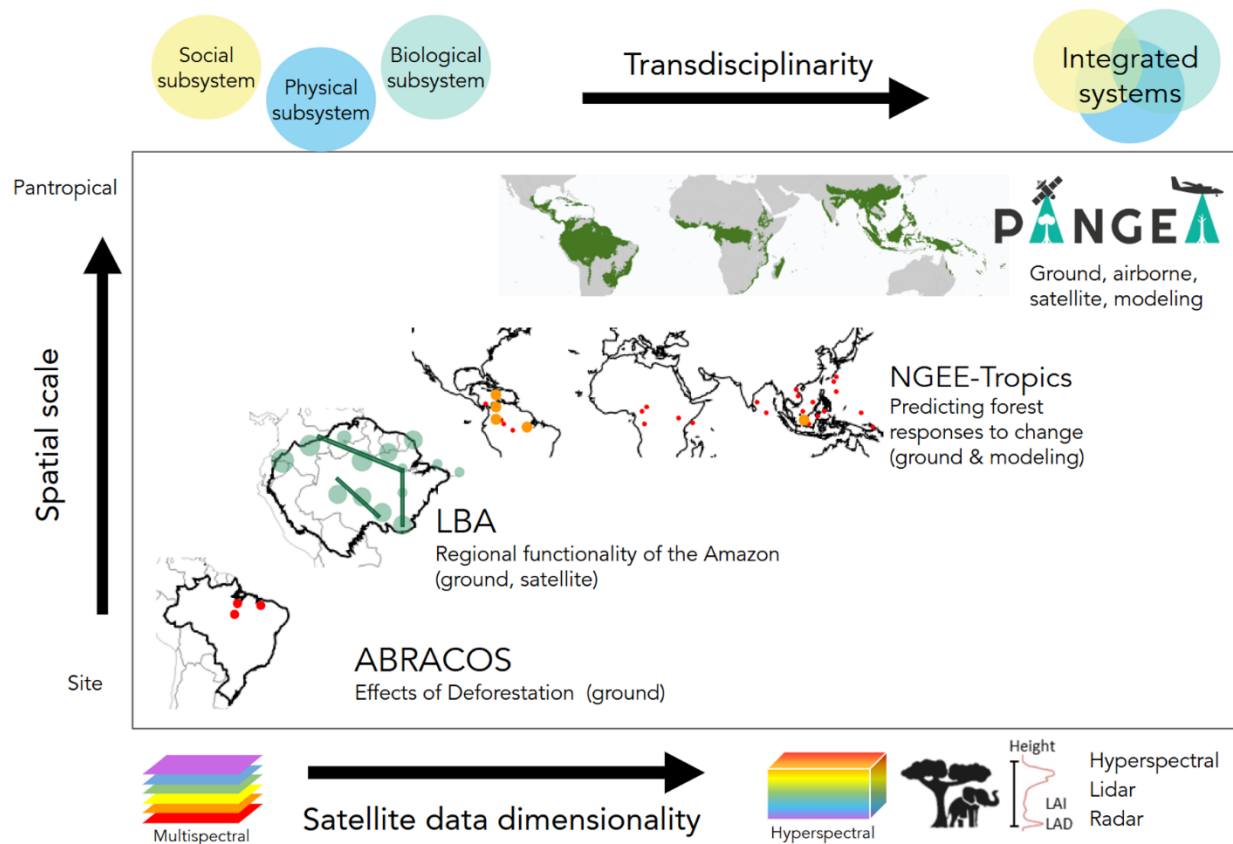
**PANGEA akan mengembangkan ilmu pengetahuan yang dibutuhkan untuk meningkatkan skala pengukuran lapangan menjadi kemampuan pemantauan satelit dan untuk meningkatkan pengetahuan dan tindakan lokal menjadi solusi global.** PANGEA akan memetakan dan mengukur stabilitas jangka panjang dari penyerapan karbon dan fluks metana untuk meningkatkan prediksi di masa depan, serta mendukung upaya mitigasi dan adaptasi perubahan iklim. PANGEA juga akan memajukan metode pemetaan keanekaragaman hayati dan proses ekosistem untuk mengembangkan pemahaman yang lebih baik mengenai hutan tropis, untuk mendukung konservasi keanekaragaman hayati yang mencakup variasi keanekaragaman hayati pada tingkat gen, spesies, komunitas, dan ekosistem. Upaya-upaya ini akan dilakukan melalui kegiatan yang adil, kolaboratif, dan dikembangkan bersama dengan masyarakat adat dan lokal yang akan memadukan Pengetahuan Ekologi Adat, Tradisional, dan Lokal (IEK, TEK, dan LEK) dengan data penginderaan jarak jauh serta bentuk-bentuk data dan pengetahuan lainnya (lihat *Bagian 6.2.4, 7.2, dan 8* untuk lebih jelasnya). Selain itu, kemajuan

ilmiah dan teknis PANGEA, yang dipandu oleh para mitra pengambil tindakan, akan mendukung pengembangan strategi adaptasi perubahan iklim petani yang disesuaikan secara regional, pengembangan sosio-bioekonomi, peningkatan ketertelusuran komoditas pertanian hingga ke daerah asalnya, dan pembuatan peringatan bencana untuk memandu respons cepat. Elemen-elemen ini mencakup Pertanyaan Sains PANGEA (*Bagian 3*) dan *Strategi Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi* (*Bagian 9*).

PANGEA akan

- **Menjawab** pertanyaan-pertanyaan sains yang relevan dan mendesak secara global yang menekankan pada perbandingan di antara formasi hutan tropis utama di planet kita melalui analisis dan interpretasi yang efektif dari pengamatan penginderaan jarak jauh (satelit dan udara) yang dikombinasikan dengan pengukuran di lapangan serta pemodelan lingkungan dan ekosistem.
- **Memberikan** informasi yang akan berkontribusi pada konservasi dan regenerasi hutan tropis, serta mitigasi dan adaptasi perubahan iklim.
- **Memastikan** kolaborasi transdisipliner dan membangun hubungan baru di antara berbagai mitra, termasuk para ilmuwan dari Amerika Serikat dan negara-negara yang memiliki hutan tropis, badan antariksa internasional, masyarakat adat dan masyarakat setempat, para pembuat keputusan, dan komunitas pengambil tindakan di daerah tropis.
- Melatih **dan mendidik** generasi ilmuwan berikutnya dan tenaga kerja yang lebih luas dari Amerika Serikat dan dari negara-negara tropis yang menjadi lokasi penelitian lapangan.
- **Membangun** warisan data terbuka dan ilmu pengetahuan terbuka untuk memperkuat kemitraan di antara para ilmuwan dan institusi di AS, negara-negara tropis, dan negara-negara lain sebagai dasar untuk penelitian dan aplikasi di masa depan.

PANGEA akan melampaui LBA (Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) dan melampaui Amazon, dengan menggunakan teknologi satelit baru dan pengamatan yang tidak tersedia selama LBA, untuk memajukan ilmu pengetahuan dan kemampuan pemantauan secara pantropis (**Gambar 5**).



**Gambar 5. Evolusi PANGEA.** PANGEA dibangun berdasarkan upaya-upaya sebelumnya yang lebih terbatas dalam cakupan geografis, akses data, dan/atau transdisipliner, dengan memanfaatkan data yang kaya, model yang kaya, komputasi yang canggih, dan kesempatan yang tepat waktu untuk mengkoordinasikan kegiatan-kegiatan pantropis.

**PANGEA dikembangkan berdasarkan masukan dari lebih dari 800 orang yang mewakili lebih dari 300 organisasi dari 42 negara di 5 benua selama upaya pelingkupan** melalui kegiatan kelompok kerja, 5 lokakarya, 10 balai kota, 18 presentasi konferensi dan simposium, dan lebih dari 150 pertemuan bilateral (**Gambar 6**). Lokakarya diselenggarakan di Washington DC, Kamerun, Peru, Brasil, dan Thailand, dengan lebih dari 275 peserta langsung dan 298 peserta virtual. Peserta dalam proses pelingkupan mewakili berbagai komunitas, termasuk komunitas akademis di daerah tropis, serta di Amerika Serikat dan Eropa, masyarakat adat dan lokal dari daerah tropis, komunitas NASA dan badan-badan federal Amerika Serikat lainnya, badan-badan antariksa internasional, badan-badan pemerintah asing, organisasi masyarakat sipil, dan industri swasta. Upaya pelingkupan ini menggarisbawahi kebutuhan yang sangat besar terhadap PANGEA dan kesempatan yang tepat waktu untuk berkoordinasi dengan berbagai kegiatan yang ada saat ini dan yang akan datang seperti yang diuraikan dalam buku putih ini.

Pada *bagian* selanjutnya dari *Bagian 1*, kami memberikan gambaran umum tentang PANGEA. Kami kemudian merinci konsep PANGEA, termasuk Tema Sains PANGEA (*Bagian 2*), Kesenjangan Pengetahuan dan Pertanyaan Sains (*Bagian 3*), kemajuan ilmiah dan teknis yang muncul dari PANGEA (*Bagian 4*), peran penting penginderaan jarak jauh NASA (*Bagian 5*), strategi penelitian dan desain studi PANGEA (*Bagian 6*), prioritas pengembangan kapasitas, pelatihan, dan pendidikan PANGEA

(Bagian 7), strategi pelibatan masyarakat (Bagian 8), kemampuan untuk memungkinkan Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Bertindak (Bagian 9), dan kelayakan teknis dan logistik (Bagian 10).

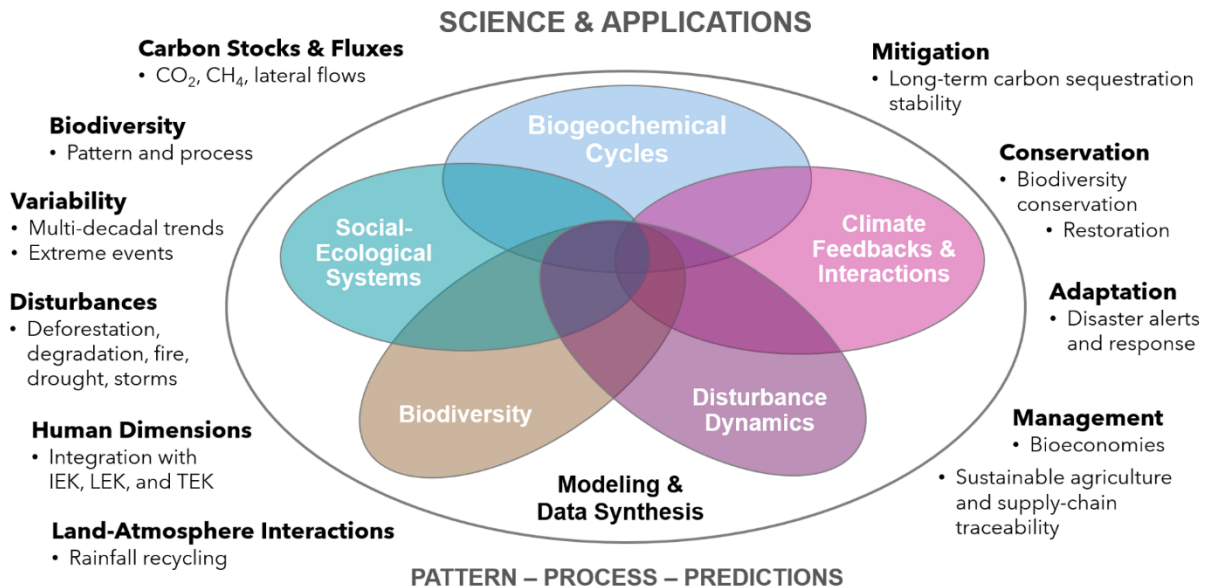
## 1.1 Gambaran Umum Tema, Pertanyaan, dan Tujuan Sains

**Pengetahuan mengenai siklus biogeokimia hutan tropis, keanekaragaman hayati, umpan balik dan interaksi iklim, sistem sosio-ekologi, dan dinamika gangguan sangat penting untuk memprediksi respons hutan tropis terhadap perubahan iklim dan penggunaan lahan.** Pemahaman terhadap faktor-faktor ini juga penting untuk memprediksi masa depan sistem bumi dan untuk mengembangkan strategi konservasi hutan dan keanekaragaman hayati serta mitigasi perubahan. Tema dan pertanyaan penelitian PANGEA dikembangkan melalui proses konsultatif yang inklusif dengan kontribusi dari ratusan ilmuwan di lima benua (Lihat *Bagian 8.1*). Tema dan pertanyaan yang dihasilkan menekankan pada penyelesaian ketidakpastian yang terkait dengan tren multidekade dan respons terhadap kejadian ekstrem di lima area tematik (**Gambar 7**):

- **Siklus Biogeokimia** mencakup pergerakan dan transformasi elemen-elemen penting (seperti karbon, nitrogen, dan fosfor) melalui biosfer, atmosfer, hidrosfer, dan litosfer bumi. Di hutan tropis, siklus ini sangat dinamis, dengan perputaran hara dan biomassa yang cepat; meskipun demikian, hutan tropis memainkan peran penting dalam penyimpanan karbon global.
- **Keanekaragaman hayati** adalah keragaman kehidupan di Bumi, termasuk variasinya di dalam dan di antara spesies dan ekosistem (keanekaragaman genetik, filogenetik, taksonomi, dan fungsional). Di hutan tropis, keanekaragaman hayati sangat tinggi di dalam dan di sepanjang hutan, mendukung interaksi yang kompleks dan fungsi ekosistem, serta menyebabkan heterogenitas dalam respon dan ketahanan terhadap iklim.
- **Interaksi dan Umpan Balik Iklim** adalah interaksi dua arah antara sistem iklim dan ekosistem. Hutan tropis secara langsung mengatur siklus karbon, air dan energi. Perubahan iklim (seperti pergeseran suhu dan curah hujan) dan perubahan tata guna lahan serta tutupan lahan (seperti kebakaran dan degradasi hutan) dapat mengubah dinamika ekosistem hutan, sehingga menciptakan lingkaran umpan balik yang mempengaruhi stabilitas iklim global.
- **Sistem Sosial-Ekologi** adalah sistem yang saling berhubungan antara manusia dan alam, di mana komponen ekologi dan sosial saling berinteraksi dan mempengaruhi satu sama lain. Di hutan tropis, sistem ini dibentuk oleh mata pencaharian, praktik budaya, dan penggunaan sumber daya oleh masyarakat lokal



**Gambar 6. PANGEA dalam angka.** Upaya pelingkupan PANGEA pada tahun 2024 melibatkan lebih dari 800 orang dari lebih dari 396 lembaga selama lokakarya, balai kota, konferensi, dan melalui pertemuan bilateral dan kegiatan kelompok kerja.



**Gambar 7. Tema-tema sains PANGAEA.** Tema sains dan aplikasi PANGAEA menekankan pada penyelesaian ketidakpastian yang terkait dengan tren multidekade dan respons terhadap kejadian ekstrem di lima bidang tematik.

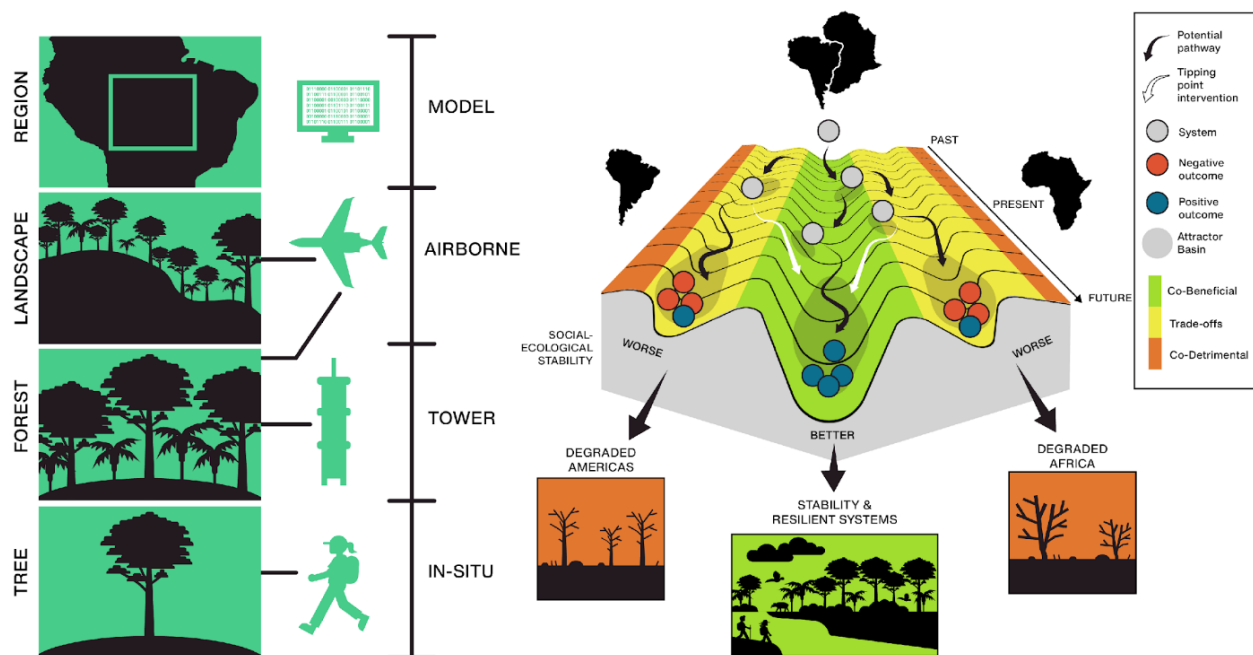
hingga global, sementara perubahan ekologi berdampak pada kesejahteraan sosial, menciptakan umpan balik yang kompleks antara aktivitas manusia dan stabilitas ekosistem.

- **Dinamika Gangguan** bervariasi menurut jenis, intensitas, dan frekuensinya, dan melibatkan peristiwa-peristiwa alami atau yang disebabkan oleh manusia, seperti kebakaran, badai, kekeringan, dan penebangan, yang mengganggu ekosistem serta mempengaruhi struktur dan fungsinya. Di hutan tropis, gangguan-gangguan ini dapat menyebabkan pergeseran dalam siklus biogeokimia, keanekaragaman hayati, dan umpan balik terhadap iklim dan sistem sosial-ekologi.

Dengan menggunakan tema-tema tersebut, PANGAEA akan menjawab pertanyaan utama (**Gambar 8**): **Seberapa rentan atau tangguh lanskap hutan tropis terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan, serta apa saja umpan balik dari perubahan hutan terhadap siklus karbon dan iklim global?**

Untuk menjawab pertanyaan yang luas mengenai kerentanan hutan tropis dan umpan baliknya, serta menginformasikan konservasi hutan dan keanekaragaman hayati, serta strategi mitigasi dan adaptasi iklim, PANGAEA perlu menjawab tiga sub-pertanyaan transdisipliner:

1. Bagaimana **pola** perubahan terkini (5-30 tahun) dan yang sedang berlangsung pada kondisi, dinamika, dan umpan balik lanskap hutan tropis, serta bagaimana **pola-pola** tersebut bervariasi secara geografis?
2. **Proses** apa yang mengendalikan heterogenitas kerentanan bentang alam hutan tropis terhadap perubahan struktural dan fungsional pada masa Antroposen?
3. Bagaimana perubahan yang sedang berlangsung dan yang **diproyeksikan** di masa depan dalam lanskap hutan tropis akan mengubah umpan balik terhadap iklim lokal, regional, dan global serta sistem sosial-ekologi?



**Gambar 8.** PANGAEA meneliti seberapa rentan atau tangguh lanskap hutan tropis, serta umpan baliknya terhadap siklus karbon dan iklim global. Ilmu pengetahuan dan aplikasi serta kolaborasi PANGAEA menggunakan pendekatan terpadu untuk menjembatani kesenjangan antara kemajuan pesat ilmu pengetahuan dan teknologi dan kemampuan masyarakat untuk memanfaatkannya demi dunia yang lebih tangguh.

Untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan di atas, kami telah menetapkan lima **tujuan PANGAEA**:

1. **Mengkarakterisasi dan mengukur respon hutan tropis yang heterogen** terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan;
2. **Mengatasi kebutuhan kalibrasi, validasi, dan pengembangan algoritme** untuk memastikan pengukuran dapat diambil secara akurat dari set data penginderaan jauh satelit di hutan tropis, yang pada akhirnya akan memajukan kegunaan misi satelit secara global;
3. **Membatasi ketidakpastian model prediksi fluks karbon tropis dan siklus biogeokimia, keanekaragaman hayati, dan umpan balik hutan-iklim** dengan meningkatkan pemahaman proses dan memajukan integrasi model data penginderaan jauh.
4. **Mengembangkan kemampuan baru untuk memantau karbon, keanekaragaman hayati, dan pertanian dengan menggunakan penginderaan jarak jauh satelit** dan mendukung pengembangan alat untuk menerjemahkan ilmu pengetahuan menjadi tindakan.
5. **Melatih generasi ilmuwan dan pemimpin berikutnya** untuk melanjutkan pekerjaan ini setelah PANGAEA.

Idealnya, PANGAEA akan dilaksanakan di seluruh wilayah tropis. Pada kenyataannya, PANGAEA perlu dibatasi cakupannya karena keterbatasan anggaran dan memprioritaskan apa yang dapat dicapai dalam jangka waktu 6 hingga 9 tahun. Membatasi PANGAEA pada satu benua tropis, bagaimanapun juga, akan menghalangi PANGAEA untuk melakukan perbandingan di dalam dan di antara benua-benua tersebut. Karena alasan ini, penelitian dan kegiatan PANGAEA akan memprioritaskan investigasi perbedaan antara dua wilayah hutan tropis terbesar di dunia, yaitu di **Amerika** dan **Afrika Tengah**. Keduanya sangat bergantung pada curah hujan daur ulang (Baker dan Spracklen, 2022), namun

merespons tren pengeringan secara berbeda (Asefi-Najafabady & Saatchi, 2013; Saatchi dkk., 2013), serta mengalami rezim tata guna lahan yang berbeda (Malhi dkk., 2013; Berenguer dkk., 2021a). Benua-benua ini juga menunjukkan proyeksi yang kontras, meskipun tidak pasti, dalam tren curah hujan (Cook dkk., 2020; Dobler dkk., 2024). Fokus pada dua benua ini, sembari mengintegrasikan kumpulan data dan penelitian dari kegiatan yang sudah ada dan saling melengkapi di seluruh wilayah tropis, akan menjelaskan pentingnya kondisi dan proses yang ada saat ini lebih dari sekadar fokus pada satu wilayah.

## 1.2 Kebutuhan Mendesak akan PANGEA

Implementasi PANGEA sangat dibutuhkan karena tiga alasan. Pertama, berbagai studi menunjukkan potensi runtuhnya ekosistem hutan tropis dalam beberapa dekade mendatang, yang secara drastis dapat berdampak pada siklus karbon dan air global, sehingga memperparah perubahan iklim (Lovejoy dan Nobre, 2018; Malhi dkk., 2009; Boulton dkk., 2022; Wunderling dkk., 2022). Mengingat peran penting ekosistem ini dalam siklus karbon dan air global, runtuhnya ekosistem hutan tropis akan berdampak besar pada seluruh Sistem Bumi, sehingga memperparah tren perubahan iklim yang terjadi saat ini (Wunderling dkk., 2024). Kedua, penelitian berbasis lapangan masih langka, dan masih ada kekurangan pengetahuan untuk memahami secara memadai data sains dari misi satelit baik dari misi saat ini - misalnya **GEDI** (Global Ecosystem Dynamics Investigation), **EMIT** (Investigasi Sumber Debu Mineral Permukaan Bumi), **OCO-2/3**, dan **ECOSTRESS** (Percobaan Radiometer Termal Spasial Ekosistem di Stasiun Antariksa), dan misi di masa depan misalnya, **NISAR \***, **BIOMASS \***, **EDGE \***, dan **SBG \***. PANGEA akan memberikan kesempatan unik untuk mendapatkan pengukuran berbasis darat dan pengambilan data dari udara dengan upaya internasional yang terkoordinasi dan tepat waktu, untuk memahami sinyal dari misi-misi ini, dan untuk mengembangkan dan mengkalibrasi metode sintesis data dan asimilasi data, serta mendorong dan membandingkan model biosfer terestrial dan model sistem sosial-ekologi. Kegagalan dalam memanfaatkan misi-misi ini untuk mengoordinasikannya dengan pengukuran berbasis lapangan akan melewatkan peluang unik untuk mengurangi ketidakpastian di wilayah dengan cadangan karbon tertinggi dan kontribusi besar terhadap siklus karbon, air, energi, dan nutrisi di antara ekosistem darat (Schimel et al., 2015; Schimel et al., 2019). Ketiga, risiko transisi kritis di hutan tropis berbeda di seluruh bioma hutan tropis (Liu dkk., 2017), dengan contoh terbaru yang menunjukkan perbedaan nyata antara Afrika dan Amerika (Hubau dkk., 2020; Bennett dkk., 2021; 2023). Kita baru saja mulai memahami mekanisme di balik perbedaan-perbedaan ini, bersama dengan keragaman struktural dan fungsional yang mendasari hutan tropis. PANGEA akan menjembatani kesenjangan pengetahuan yang sangat penting, memungkinkan kemajuan tepat waktu yang secara langsung mendukung Area Fokus Siklus Karbon dan Ekosistem NASA, selaras dengan Area Fokus Siklus Air dan Energi serta Variabilitas dan Perubahan Iklim, kegunaan misi termasuk NISAR dan SBG, serta perangkat untuk mengimplementasikan dan mengevaluasi komitmen iklim dan keanekaragaman hayati global.

### 1.3 Peran Pengamatan Penginderaan Jauh

**PANGEA akan mengisi kesenjangan data dan metode yang penting untuk memajukan penskalaan antara banyak pengukuran berbasis darat dan pengamatan satelit dan udara.** Kita berada di masa yang kaya data, kaya model, dan maju secara komputasi. Dalam beberapa tahun terakhir, lidar luar angkasa, radar gelombang mikro, hiperspektral, altimeter, dan kemampuan penginderaan jarak jauh lainnya telah beroperasi pada berbagai skala. Satelit dan sensor udara memungkinkan pengambilan data konsentrasi CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> di atmosfer secara lebih langsung, aliran air tanah dan air permukaan yang dapat mengungkap aliran karbon dan nutrisi secara lateral, serta keanekaragaman struktural, fungsional, dan dalam beberapa kasus keanekaragaman taksonomi hutan. Namun, di wilayah hutan tropis, pengukuran berbasis lapangan masih jarang dilakukan, sehingga membatasi kegunaan global dari pengamatan satelit. Hanya sedikit negara hutan tropis yang memiliki inventarisasi hutan dan satwa liar, menara fluks, atau data meteorologi yang dilakukan secara rutin dan sistematis, terutama di Afrika tropis. Meskipun jumlah lokasi penelitian dan pengukuran di lapangan terbatas, namun, informasi penting mengenai proses biogeokimia, ekologi, dan hidrologi dapat diperoleh dari data tersebut. Kelangkaan data ini menyulitkan untuk meningkatkan skala pengukuran dan analisis ke wilayah regional, kontinental, atau pantropis. PANGEA akan melakukan pengumpulan data yang terkoordinasi dan memajukan metode untuk meningkatkan skala yang lebih akurat antara pengukuran di darat dan menara di satu sisi dan pengamatan dari udara dan ruang angkasa di sisi lain.

**Untuk dapat sepenuhnya memanfaatkan pengamatan satelit baru dari sensor baru, kami membutuhkan data kalibrasi dan validasi yang terkoordinasi. Kesenjangan data yang besar dan ketidakpastian proses di hutan tropis saat ini membatasi pengembangan algoritma dan produk, sehingga mencegah pemanfaatan global dari sensor satelit ini untuk direalisasikan sepenuhnya.**

**Konstelasi satelit pengamat bumi internasional yang beroperasi saat ini, yang akan diluncurkan, dan yang masih dalam tahap awal perencanaan dan implementasi menawarkan banyak dimensi informasi yang sebelumnya tidak tersedia atau tidak digunakan secara luas dalam studi hutan tropis.** Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA) (Avisar dkk., 2002; Davidson dkk., 2012; Keller dkk., 2009), proyek hutan tropis NASA sebelumnya, dimulai pada tahun 1998 sebelum peluncuran satelit EOS Terra dan Aqua. Landsat kemudian menjadi alat utama untuk memantau deforestasi (Skole dan Tucker, 1993) dan selama dekade pertama penelitian LBA, LBA digunakan untuk memperkirakan penebangan (Asner dkk., 2005) dan kebakaran hutan di bawah tegakan pohon (Morton dkk., 2011). Informasi penginderaan jauh dalam model ekologi awal, seperti model biosfer Carnegie-Ames-Stanford (CASA) (Potter dkk., 1993), pada awalnya menggabungkan data indeks vegetasi perbedaan normal (NDVI) dari satelit cuaca yang mengorbit di kutub (AVHRR) yang dikalibrasi dengan produktivitas primer bersih. Memahami tantangan pencocokan data ini memotivasi hubungan baru dengan data penginderaan jauh yang lebih canggih. Penafsiran data MODIS menghasilkan pengamatan bahwa wilayah Amazon memiliki sinyal musiman yang berbeda, yaitu musim hijau dan musim coklat (Huete et al., 2006). LBA mengisi kekosongan dalam pengetahuan, mengembangkan pemahaman dasar tentang kerentanan Amazon terhadap perubahan iklim. Selain itu, LBA menciptakan komunitas penelitian yang mandiri dan bersemangat yang telah berkembang di Brasil dan masih mempengaruhi seluruh Amerika Selatan. LBA dibatasi oleh area fokus Amazon, dan jenis serta ketersediaan pengamatan lapangan dan data penginderaan jauh. Proyek Next Generation Ecosystem Experiment in the Tropics (NGEE-Tropics, <https://ngee-tropics.lbl.gov>) yang sedang berlangsung berfokus pada prediktabilitas proses ekosistem tropis pada skala spesifik lokasi dan

meningkatkan kemampuan untuk meningkatkan wawasan ini ke tingkat benua dan pantropis masih menjadi tantangan yang sangat penting. PANGEA akan mengatasi keterbatasan upaya-upaya sebelumnya dengan memanfaatkan data penginderaan jarak jauh yang lebih baru dan yang akan datang untuk mengukur kondisi dan proses ekosistem. Pendekatan ini membuka jalan bagi pemahaman yang lebih komprehensif dan prediktif mengenai ekosistem tropis dari skala lokal hingga pantropis. **Teknologi sensor satelit baru bergerak lebih dari sekadar menilai tingkat kehijauan (lihat Bagian 5) dan memberikan wawasan yang lebih dalam mengenai fungsi hutan tropis untuk memungkinkan pengukuran yang lebih langsung terhadap fluks ekosistem, keanekaragaman hayati, dan respons terhadap perubahan.**

**Untuk memahami hutan tropis dalam skala besar, diperlukan penginderaan jarak jauh satelit yang dihubungkan dengan pengukuran di lapangan.** Kesenjangan pengetahuan (lihat *Bagian 3*) yang akan diatasi oleh PANGEA tidak dapat dijawab tanpa pengamatan satelit pantropis, analisis integratif, dan model. Untuk memajukan penggunaan penginderaan jauh satelit secara efektif, diperlukan integrasi yang cermat, kreatif, dan teliti dari berbagai bentuk data di seluruh skala spasial dan temporal. Banyaknya data satelit baru, dipasangkan dengan kemajuan dalam komputasi awan, pembelajaran mesin, dan AI akan memungkinkan analisis data yang lebih kuat daripada proyek TE NASA sebelumnya, seperti LBA. Saat ini, terdapat tantangan dari pengamatan lapangan yang langka dan ketidaksesuaian skala dengan data satelit tropis yang menghambat validasi metrik penginderaan jarak jauh dan pengembangan model AI. PANGEA mengatasi masalah ini dengan mengintegrasikan data darat, menara, drone, pesawat, dan satelit dengan pendekatan penskalaan yang telah disempurnakan dalam proyek-proyek sebelumnya seperti Arctic-Boreal Vulnerability Experiment (ABoVE).

## 1.4 Perlunya Pengumpulan Data dan Kerja Sama Tim yang Terkoordinasi

**Menyadari jejak mendalam yang ditinggalkan kolonialisme pada penelitian hutan tropis, bersama dengan ilmu pengetahuan parasut dan layang (Culotta dkk., 2024), PANGEA mengambil pendekatan interaktif dan terjalin untuk memastikan pelibatan yang adil dan etis dengan ilmuwan, lembaga dan mitra dari pemerintah, serta Masyarakat Adat dan Masyarakat Setempat (IPLC).** Beberapa bagian menjelaskan pendekatan PANGEA terhadap pelibatan masyarakat (*Bagian 8*), struktur organisasi yang inklusif (*Bagian 10.1*), Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi (*Bagian 9*), pelatihan dan pendidikan (*Bagian 7*), ilmu pengetahuan terbuka dan manajemen data (*Bagian 10.3*), dan perjanjian internasional ketika melakukan kampanye udara (*Bagian 6.2.4*). Pendekatan PANGEA dibangun di atas pengakuan bahwa ilmu pengetahuan sistem bumi pada dasarnya memiliki banyak segi dan kompleks. Program Ekologi Terrestrial NASA telah mempromosikan model multi-investigator selama beberapa dekade kampanye lapangan yang mencakup Percobaan Lapangan ISLSCCP Pertama (First ISLSCCP Field Experiment/FIE), Studi Ekosistem-Atmosfer Boreal (BOREAS), Percobaan Biosfer-Atmosfer Skala Besar di Amazonia (LBA), dan ABoVE. PANGEA juga akan membina kerja sama erat dengan lembaga-lembaga penting di Amerika Serikat, termasuk **USDA, USFS, DOE, USGS, Smithsonian**, universitas-universitas terkemuka, termasuk **Penn State, University of Oklahoma, UCLA**, dan **University of Maryland**, masyarakat adat, termasuk **Aliansi Global Masyarakat Teritorial (Global Alliance of Territorial Communities/GATC)**, serta mitra internasional, termasuk lebih dari 390 lembaga, organisasi, dan universitas dari berbagai negara tropis (**Gambar 9**).

Kemitraan ini mencakup berbagai upaya penelitian, mengintegrasikan keahlian lintas disiplin ilmu untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan yang kritis dan berbagai faktor pendorong serta proses yang saling berinteraksi untuk memahami hutan tropis. Banyak variabel yang membutuhkan pengetahuan ahli, mulai dari akuisisi dan penggunaan pengamatan satelit, dan instrumen seperti spektrometer pencitraan berkinerja tinggi hingga identifikasi botani spesies pohon atau pengetahuan tradisional tentang interaksi spesies. Tidak ada satu individu atau sekelompok kecil individu yang memiliki semua pengetahuan dan alat yang dibutuhkan dalam investigasi sains sistem bumi. Untuk memenuhi kebutuhan analisis integratif dari bioma tropis, dibutuhkan tim besar yang terdiri dari para ahli yang bekerja sama. PANGEA membutuhkan kolaborasi yang kuat untuk memastikan bahwa pengukuran dikoordinasikan dalam ruang dan waktu untuk memaksimalkan nilainya dalam interpretasi dan pemodelan. Hal ini hanya dapat dicapai melalui tim transdisipliner yang kooperatif dan



**Gambar 9. PANGEA menghubungkan titik-titik.** PANGEA memberikan kesempatan unik untuk mendapatkan data darat dan udara dengan upaya terkoordinasi dan tepat waktu, untuk memaksimalkan nilai misi satelit generasi saat ini dan generasi berikutnya, melalui kemitraan dengan lembaga dan organisasi di seluruh dunia dan di A.S. PANGEA akan berkoordinasi secara erat dengan kegiatan yang ada saat ini dan yang akan datang untuk mengisi kekosongan data, pengetahuan, dan aplikasi yang masih ada.

terkoordinasi. Untuk mengikutsertakan, memberdayakan, dan memajukan kelompok-kelompok yang secara historis kurang terwakili dalam bidang sains, teknologi, teknik, dan matematika (STEM) - misalnya, orang-orang yang diidentifikasi sebagai orang kulit hitam, penduduk asli, Hispanik, perempuan, atau penyandang disabilitas - PANGEA akan memprioritaskan keterlibatan yang beretika dan berkeadilan secara keseluruhan.

## 1.5 Kampanye Lapangan Ekologi Terestrial PANGEA dan Domain Studi

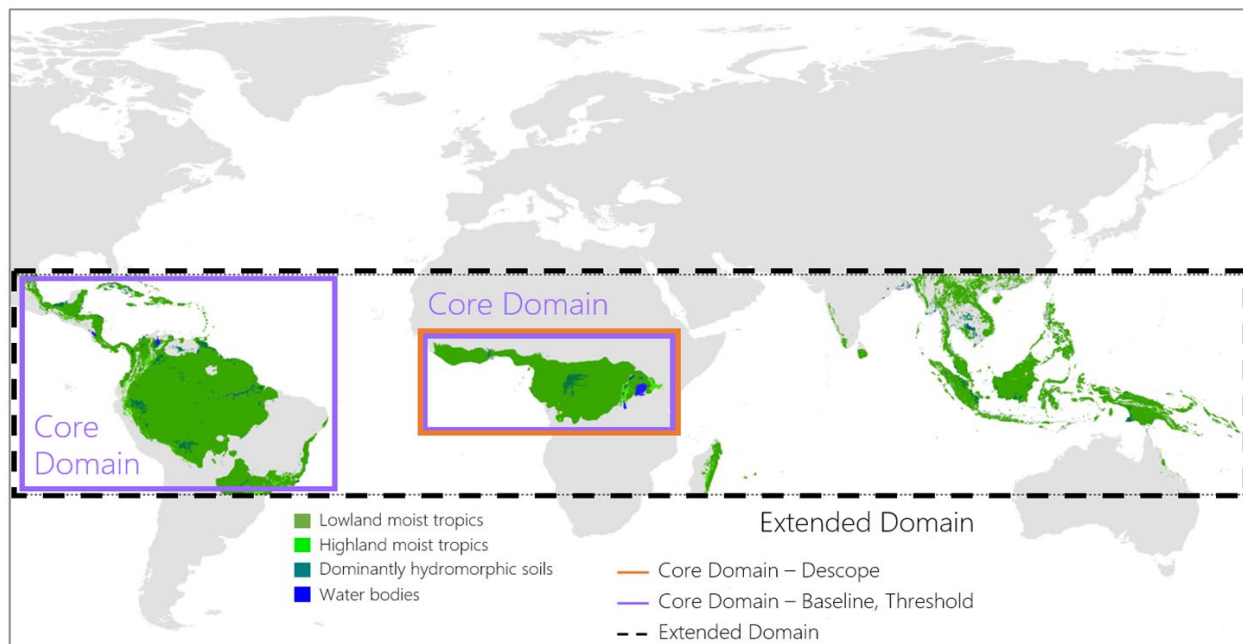
PANGEA merupakan proyek multistap dan multistap yang terdiri dari penginderaan jarak jauh melalui satelit dan udara, pengukuran di lapangan, dan kampanye skala lanskap. Kegiatan PANGEA akan mengukur serangkaian variabel untuk mengkarakterisasi struktur, fungsi, dinamika, fluktuasi, dan sistem sosial-ekologi dari beragam lanskap hutan di seluruh wilayah tropis. Dengan menggunakan desain kampanye yang modular dan fleksibel, PANGEA akan memajukan kemampuan penginderaan jarak jauh satelit di daerah tropis untuk memahami respons heterogen hutan tropis terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan. PANGEA akan memperoleh pengukuran berbasis lapangan yang terkolokasi dengan data penginderaan jauh dari udara (misalnya, hiperspektral, lidar, SAR, fluks karbon) yang hingga saat ini telah dikumpulkan hanya di beberapa lokasi di daerah tropis pada waktu yang berbeda, oleh organisasi yang berbeda, dan dengan metode yang berbeda.

PANGEA akan mencakup domain **inti** dan domain yang **diperluas**. Domain inti adalah tempat komponen yang didanai NASA untuk kampanye darat, menara, drone, dan lapangan pesawat yang terkoordinasi akan berlangsung di beberapa lanskap besar (sekitar 10.000 km<sup>2</sup>). *Bagian 6.2.2* menguraikan Kandidat Lanskap yang dinilai selama proses pelingkupan yang akan dievaluasi selama fase Definisi Ilmu Pengetahuan PANGEA, sebelum pemilihan akhir. Domain yang diperluas akan mencakup hutan basah pantropis dan merupakan wilayah yang lebih luas dari kepentingan ilmiah, di mana proyek-proyek tambahan dapat dilakukan melalui kemitraan, dan di mana analisis satelit dan pemodelan akan ditekankan. *Kotak 1* menjelaskan kajian awal mengenai heterogenitas di dalam bentang alam geografis utama di dalam domain PANGEA yang diperluas. Domain PANGEA (inti + perluasan) mencakup sistem sosial-ekologi hutan tropis dan bentang alam terkait yang ditemukan di daerah tropis lembab serta skala spasial yang diperlukan untuk menjawab pertanyaan utama (*Bagian 3*). Baik domain inti maupun diperluas akan mencakup hutan tropis lembab, termasuk hutan yang tergenang, lahan basah, dan lahan gambut.

PANGEA akan memanfaatkan investasi Ekologi Terestrial NASA untuk sumber daya intinya. Untuk memperhitungkan berbagai skenario pendanaan NASA untuk PANGEA, kami telah menurunkan tingkat **Baseline**, **Ambang Batas**, dan **Cakupan Pengukuran Ilmiah Esensial** dari Tujuan Ilmu Pengetahuan PANGEA (lihat *Bagian 6.2.1* untuk rinciannya). Pengukuran Ilmiah Esensial akan memungkinkan PANGEA untuk (1) memahami perbedaan stok dan fluks karbon tropis serta kekuatan yang mendorong heterogenitas, (2) menyelesaikan masalah penskalaan antara data lapangan dan satelit dengan memajukan pemahaman proses dan metode penskalaan, dan (3) meramalkan berbagai respons ekosistem hutan tropis terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan. Sebagaimana disebutkan di atas, domain inti PANGEA mencakup hutan basah tropis di Afrika dan, tergantung pada tingkat Pengukuran Ilmiah Esensial, hutan basah tropis di Amerika (**Gambar 10**).

Di sini, kami menyajikan gambaran umum mengenai Strategi dan Desain Studi, yang dijelaskan secara rinci di *Bagian 6*. Kami akan berfokus pada kampanye lanskap PANGEA dan kegiatan pengukuran pada awal dan akhir musim kemarau. Pada awal musim kemarau, pengukuran akan menangkap dinamika sistem pada periode berkurangnya tekanan, segera setelah musim hujan lebat. Periode waktu ini memungkinkan pengukuran multiskala terkoordinasi yang tidak dapat dicapai selama puncak musim hujan, ketika tutupan awan membatasi penginderaan jarak jauh optik di daerah tropis. Kampanye pengukuran di akhir musim kemarau akan menangkap waktu ketika sistem sosial-ekologi tropis berada dalam kondisi paling tertekan dalam hal air dan suhu. Meskipun kami menyadari bahwa data yang dikumpulkan hanya pada musim kemarau berisiko membiaskan pemahaman mengenai hutan tropis karena adanya perbedaan musiman yang kuat dalam hal dinamika dan proses, termasuk siklus karbon, hidrodinamika, interaksi spesies, dan aktivitas penggunaan lahan (misalnya kebakaran dan pembukaan lahan), namun kebutuhan untuk mendapatkan pengukuran terestrial, udara, dan satelit secara bersamaan membuat hal tersebut menjadi keputusan yang pragmatis. Pada akhir musim hujan, sebagian besar proses yang beroperasi selama puncak musim hujan akan tetap ada. Untuk alasan ini, PANGEA masih dapat menangkap perbedaan musiman dengan berfokus pada awal dan akhir musim kemarau. Untuk memenuhi tujuan ilmu pengetahuan dan aplikasi PANGEA, ada tiga strategi potensial yang disajikan:

- **Baseline:** Pengukuran PANGEA mencakup ~3-6 lanskap tropis Afrika dan ~3-6 lanskap tropis Amerika yang menangkap akhir musim hujan dan akhir musim kemarau.
- **Ambang batas:** Pengukuran PANGEA mencakup 2 lanskap tropis Afrika dan 2 lanskap tropis Amerika yang menangkap akhir musim hujan dan akhir musim kemarau.



**Gambar 10. Domain studi PANGEA.** Domain inti PANGEA, di bawah level Baseline dan Ambang Batas (garis ungu solid) dan Descope (garis oranye solid) dari Pengukuran Ilmiah Esensial, serta domain yang diperluas (garis hitam putus-putus). Batas-batas bersumber dari zona agroekologi GAEZv4 berikut ini: dataran rendah tropis lembab, dataran tinggi tropis lembab, tanah yang dominan hidromorfik, dan lahan dengan keterbatasan tanah/medan yang parah.

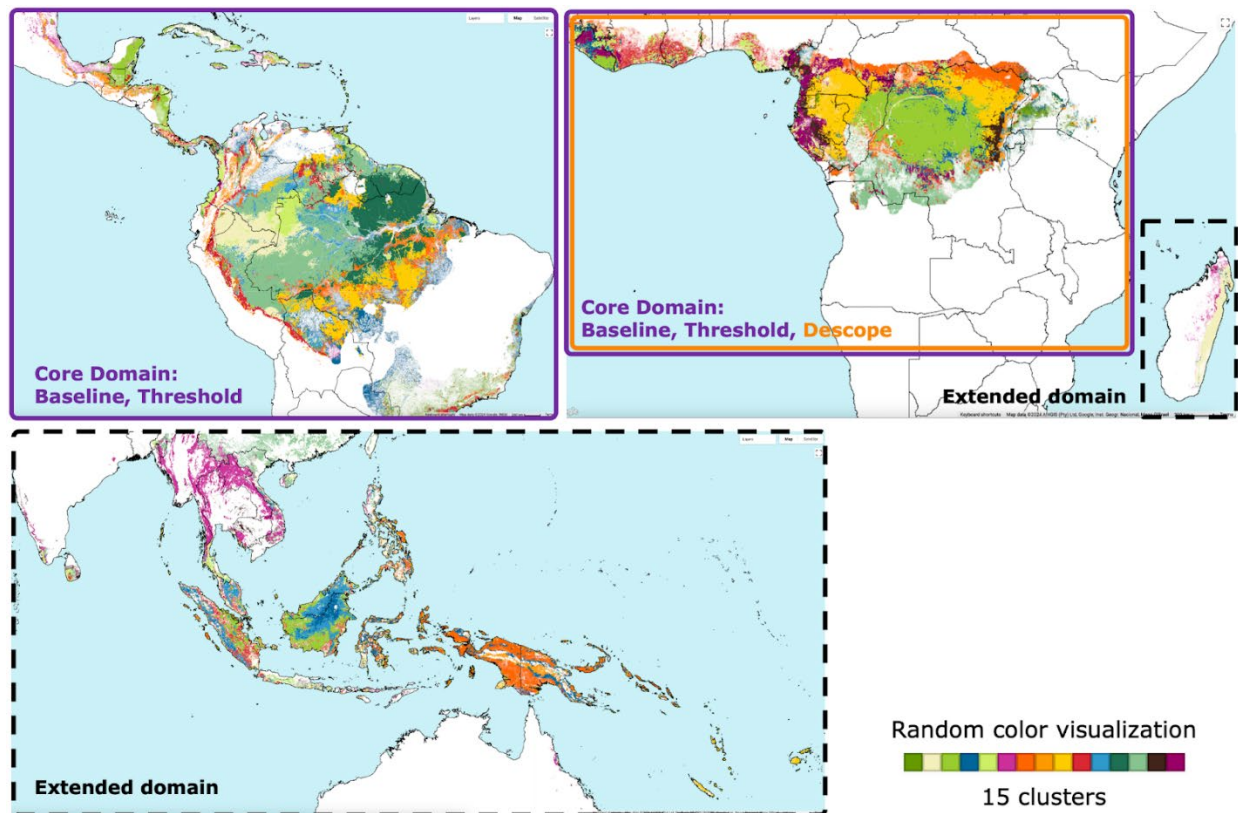
- **Cakupan:** Pengukuran PANGEA mencakup 2 lanskap tropis Afrika yang menangkap akhir musim hujan dan musim kemarau, yang akan dibandingkan dengan informasi untuk daerah tropis Amerika yang dikumpulkan dari data yang ada, proyek dan kampanye lain yang dipimpin oleh para kolaborator, pembelian data komersial, dan pesawat tak berawak yang dapat dikerahkan. Opsi cakupan ini memenuhi sebagian tujuan PANGEA dengan tetap memperhitungkan potensi pembatasan pendanaan atau ketidakpastian geopolitik.

Pengukuran Baseline, Threshold, dan Descope yang dirinci dalam *Bagian 6.2.1* mewakili proyek-proyek yang didanai NASA yang berdiri sendiri, tanpa ketergantungan pada dana non-NASA atau upaya sinergis (**Tabel 1**). Kampanye intensif dalam strategi ini dirancang untuk diimplementasikan sebagai modul yang berdiri sendiri dengan ketergantungan yang terbatas sehingga jadwal dan profil anggaran secara keseluruhan dapat fleksibel. Mengingat urgensi dan pentingnya topik ini, serta minat yang begitu besar dari masyarakat, terdapat potensi yang kuat untuk menambah atau bahkan melebihi kontribusi NASA (lihat *Bagian 10.3* untuk lebih jelasnya). Kecuali disebutkan lain, domain inti dalam buku putih ini mengacu pada domain yang ditetapkan untuk tingkat Dasar Pengukuran Ilmiah Esensial.

**Tabel 1.** Pencapaian PANGEA di seluruh versi Baseline, Threshold, dan Descope.

DAPAT DICAPAI	BASLINE	AMBANG BATAS	DESCOPE
VARIABILITAS DI SELURUH BENUA	Ya.	Ya.	Tidak.
VARIABILITAS DI DALAM BENUA	Ya.	Terbatas	Terbatas
FUNGSI HUTAN TROPIS DI SEPANJANG GRADIEN LINGKUNGAN	Beberapa gradien. Perbandingan antar benua.	Gradien tunggal. Efek tidak langsung melalui gradien antar benua.	Gradien tunggal atau ko-linier.
KEMAMPUAN UNTUK MENYEDIAKAN DATA KALIBRASI DI WILAYAH KRITIS	Sangat kuat	Kuat	Sedang
KEBERHASILAN BERGANTUNG PADA KEMITRAAN DAN PENDANAAN EKSTERNAL	Tidak kontingen	Agak kontingen	Sangat kontingen
KEMAMPUAN UNTUK MENJAWAB PERTANYAAN-PERTANYAAN ILMIAH UTAMA PANGEA	Sepenuhnya	Sebagian besar	Sebagian

Lokasi area penelitian utama di dalam domain inti ini akan didasarkan pada (1) peluang untuk melakukan penelitian terpadu di seluruh tema ilmu pengetahuan (*Bagian 2*); (2) terjadinya variabilitas utama sehubungan dengan dinamika biotik, abiotik, dan gangguan (**Gambar 11**); dan (3) keberadaan penelitian yang sedang berlangsung atau yang direncanakan yang didanai oleh NASA, serta hubungan dan kegiatan yang sedang berlangsung yang dilakukan oleh kolaborator dan institusi lokal dan internasional. Selama studi pelingkupan, analisis variabilitas awal di seluruh domain yang diperluas dilakukan untuk mengevaluasi heterogenitas spasial (lihat **Kotak 1**).



**Gambar 11. Analisis variabilitas.** Hasil dari analisis variabilitas awal dijelaskan pada Kotak 1. Untuk setiap benua, kami mendefinisikan 15 kluster yang menggambarkan heterogenitas hutan di seluruh bentang alam, dengan menggunakan set data iklim, struktur, komposisi dan fungsi hutan, keanekaragaman hayati, penggunaan lahan, tutupan lahan, dan sejarah gangguan. Kluster di setiap benua didefinisikan secara independen dan ditampilkan dalam warna acak yang berbeda. Warna yang sama di benua yang berbeda tidak menunjukkan kesesuaian kondisi lingkungan di seluruh benua.

Kampanye udara akan menjadi komponen utama dalam akuisisi data Baseline, Threshold, atau Descope skala lanskap. Hal ini akan mencakup data pengamatan fluks dari udara untuk mengukur fluks  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , panas sensibel, dan panas laten dengan resolusi spasial yang tinggi; reflektansi hiperspektral dan lidar tapak kecil untuk mengukur sifat-sifat daun kanopi dan struktur vegetasi; data radar bukaan sintesis (synthetic aperture radar/SAR) untuk mengukur lahan basah, sistem yang tergenang secara musiman, dan dinamika gangguan; serta lidar tapak kecil untuk mengukur heterogenitas vertikal dan horisontal dengan tingkat akurasi yang tinggi pada struktur ekosistem dan indeks area tanaman. Pengukuran dan pengetahuan berbasis lapangan sangat penting untuk (1) memvalidasi pengamatan udara dan satelit, (2) mengungkap mekanisme ekologi, dan (3) mengevaluasi ketergantungan skala dalam ekosistem tropis. PANGEA mengatasi ketiga kesenjangan ini di hutan tropis melalui kemitraan dengan organisasi lokal dan infrastruktur yang ada untuk memperluas pengamatan lapangan dan memajukan integrasi data dan pengetahuan, termasuk data in-situ manual dan TEK (mis, pengukuran fluks getah, perangkat kamera, dan sensor bioakustik); fluks kovarians eddy dan data meteorologi; penginderaan jarak jauh proksimal berbasis menara (misalnya, SIF, radiasi inframerah termal, VOD, dan kamera fenologi [PhenoCams]); dan penginderaan jarak jauh proksimal berbasis pesawat nirawak (drone). Serangkaian model akan dikembangkan dari data dan informasi yang dikumpulkan, serta produk sintesis yang berasal dari kumpulan data yang diperoleh, yang akan digunakan untuk menginisialisasi, memberikan kondisi batas, dan membandingkan model-

### **Kotak 1. Penilaian Heterogenitas dalam Domain yang Diperluas PANGEA.**

Ekosistem hutan tropis bersifat heterogen, dan pola struktur hutan, komposisi spesies, dan fungsi hutan muncul dari interaksi antara iklim, sejarah geologi, tanah, topografi, biogeografi, gangguan alam, interaksi biotik, dan penggunaan lahan dan perubahan tutupan lahan. Kampanye lapangan PANGEA akan dirancang untuk menangkap dan mengambil sampel hutan yang membentang di berbagai bentang alam yang heterogen. Untuk memandu pemilihan lanskap, tim PANGEA melakukan analisis kluster ekosistem hutan tropis yang menjelaskan berbagai faktor pendorong heterogenitas (**Gambar 11**). Analisis ini didasarkan pada (1) struktur hutan dari biomassa hidup dan fluks karbon bersih (Harris et al., 2021) dan tinggi kanopi (Lang et al., 2023); (2) metrik keanekaragaman hayati dari kekayaan spesies untuk taksa non-tumbuhan (mis, IUCN, 2024); (3) fluoresensi klorofil yang diinduksi oleh matahari (SIF) (Li dan Xiao, 2019) sebagai proksi produktivitas primer bruto (GPP); (4) suhu tahunan rata-rata dan curah hujan total dari ERA5 (Hersbach et al, 2020) dan defisit air iklim jangka panjang (Chave et al. 2014); (5) nitrogen tanah dan kandungan tanah liat dari SoilGrids2.0 (Poggio et al., 2021); (6) informasi topografi dari ketinggian di atas drainase terdekat (Donchyts et al., 2016); dan (7) kumpulan data modifikasi manusia global (pemukiman, pertanian, transportasi, pertambangan, energi, dan infrastruktur) (Kennedy et al., 2019). Untuk memastikan bentang alam konsisten dengan sejarah evolusi, setiap benua dianalisis secara terpisah, menghasilkan 15 kelompok unik untuk setiap wilayah (Amerika tropis, Afrika, dan Australasia). Penilaian awal ini tidak memperhitungkan ketidakpastian dalam set data, dan tidak berusaha mengidentifikasi jumlah kluster yang paling sederhana. PANGEA akan menyempurnakan pendekatan ini selama fase Definisi Ilmu Pengetahuan dan menggabungkan hasil-hasil ini dengan daftar kandidat bentang alam (*Bagian 6.2.2*), wilayah yang mendominasi ketidakpastian model dan sintesis data (*Bagian 6.3.1*), dan penilaian kelayakan teknis (*Bagian 10*) untuk menentukan bentang alam prioritas di dalam Rencana Eksperimen Ringkas (*Bagian 10.5*).

model berbasis proses (*Bagian 6.3*). Penginderaan jarak jauh dan pengukuran lapangan yang dilakukan PANGEA untuk integrasi data-model akan membantu menggeneralisasi kemampuan pemetaan di seluruh wilayah tropis, dan memodelkan fluks karbon, air, dan energi serta hubungannya dengan keanekaragaman hayati untuk mengkaji stabilitas hutan tropis dalam proyeksi iklim di masa depan.

## 1.6 Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi

Sistem Bumi dengan sistem geofisika, biologi, dan sosial yang saling terhubung sedang mengalami momen yang sangat unik dalam sejarahnya. Kita harus mengambil kesempatan untuk mendapatkan manfaat dari kemajuan luar biasa dalam peralatan modern, daya komputasi (termasuk AI), dan infrastruktur penelitian. Kemajuan-kemajuan ini akan membantu manusia untuk mengambil tindakan tegas dalam melestarikan hutan dan keanekaragaman hayati, memitigasi dan beradaptasi terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan, serta meningkatkan ketahanan pangan dan air serta kesehatan manusia. Laju perubahan yang semakin cepat di daerah tropis mendorong urgensi untuk menerapkan wawasan dari batas-batas Ilmu Pengetahuan Bumi NASA. Sejak dimulainya program Aplikasi Perusahaan Ilmu Pengetahuan Bumi pada tahun 2001 (Rencana Strategis ESE) hingga peluncuran strategi Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Bertindak pada tahun 2024 (St Germain, 2024 - [Rencana Strategis ES2A](#)), NASA telah melakukan inovasi dalam pendekatan sistem untuk memfasilitasi pengumpulan Pengamatan Bumi dan prediksi menjadi alat pendukung keputusan dan manajemen bagi pengguna dan kolaborator yang beragam untuk memajukan inisiatif lokal mereka yang menyediakan layanan penting bagi masyarakat. Survei Dekade 2017 mengarahkan kami untuk "mengejar tujuan yang semakin ambisius dan solusi inovatif yang meningkatkan dan mempercepat nilai sains/aplikasi pengamatan dan analisis Bumi berbasis ruang angkasa bagi bangsa dan dunia dengan cara yang memberikan nilai yang besar" (Survei Dekade, 2017).

**PANGEA akan membangun investasi strategis dan kolaborasi internasional untuk menjembatani kesenjangan antara kemajuan pesat dalam ilmu pengetahuan dan teknologi, dan kemampuan masyarakat untuk memanfaatkannya demi dunia yang lebih tangguh.**

Kontribusi PANGEA dalam Earth Science to Action (ES2A) untuk memajukan dan mengintegrasikan pengetahuan ilmu pengetahuan bumi untuk memberdayakan umat manusia dalam menciptakan dunia yang lebih tangguh dijelaskan di Bagian 9 secara rinci. Singkatnya, PANGEA mendukung strategi ES2A NASA dengan

- *Menyelidiki risiko melewati ambang batas kritis dan potensi dampak lingkungan dan sosial yang berkelanjutan.*
- *Mendukung upaya untuk meningkatkan ketahanan bumi melalui penilaian risiko dan kontinjensi serta pengembangan strategi mitigasi dan adaptasi untuk merespons perubahan global.*
- *Mengembangkan alat, model, dan sistem penilaian end-to-end yang efisien dan interaktif dengan latensi, skala temporal dan spasial yang sesuai, serta kuantifikasi ketidakpastian untuk memungkinkan tindakan berbasis sains bagi masyarakat, pembuat kebijakan, dan pengambil tindakan.*

## 2 Tema Sains PANGEA

Karena kompleksitas yang melekat pada ekosistem terestrial tropis dan umpan baliknya dengan sistem bumi, PANGEA mengambil pendekatan transdisipliner yang terintegrasi di lima tema ilmu pengetahuan yang telah diperkenalkan di *Bagian 1.1*: Siklus Biogeokimia, Keanekaragaman Hayati, Interaksi dan Umpan Balik Iklim, Sistem Sosial-Ekologi, dan Dinamika Gangguan. Memahami pola dan

proses serta membatasi ketidakpastian proyeksi masa depan membutuhkan keahlian yang beragam dan kolaborasi yang terkoordinasi. PANGEA menjembatani berbagai disiplin ilmu dan cara mengetahui untuk bersama-sama menghasilkan ilmu pengetahuan yang akan mengatasi kesenjangan pengetahuan yang spesifik dan mendukung aplikasi yang sangat dibutuhkan.

Pada bagian ini, kami menguraikan kondisi sains saat ini berdasarkan area tematik. Pada *Bagian 3*, kami menyajikan pertanyaan-pertanyaan sains terpadu PANGEA dalam menanggapi kesenjangan pengetahuan yang terkait dengan pola, proses, dan proyeksi masa depan di seluruh tema sains. *Bagian 4* menjelaskan bagaimana menjawab pertanyaan-pertanyaan ini akan menghasilkan kemajuan ilmiah yang besar. (Lihat *Lampiran G* untuk *Topik-topik di luar cakupan PANGEA*).

## 2.1 Siklus Biogeokimia

***Tema Sains PANGEA ini akan menyelidiki pola variabilitas spasial dan temporal dalam stok dan fluks karbon - termasuk interaksi dengan siklus biogeokimia lainnya - serta proses yang mengendalikan perubahan heterogen, memberikan informasi yang akan meningkatkan proyeksi di masa depan.***

**Pertukaran karbon dioksida di atmosfer tropis:** Karbon dioksida di atmosfer ( $\text{CO}_2$ ) adalah gas rumah kaca (GRK) yang berdampak besar pada sistem iklim global. Biosfer terestrial merupakan penyerap  $\text{CO}_2$  atmosfer yang besar dengan pertukaran biosfer bersih (NBE) global saat ini diperkirakan mencapai  $3,3 \text{ Pg tahun}^{-1}$ , mengimbangi  $\sim 30\%$   $\text{CO}_2$  yang dipancarkan oleh bahan bakar fosil setiap tahunnya (Friedlingstein et al., 2023). NBE mengacu pada keseimbangan total  $\text{CO}_2$  yang dipertukarkan antara ekosistem dan atmosfer. Ekosistem terestrial tropis berkontribusi hingga  $0,6 \pm 0,4 \text{ PgC per tahun}^{-1}$  dari penyerap ini (Friedlingstein dkk., 2023) dan berkontribusi besar terhadap variabilitas antar tahun  $\text{CO}_2$  global di atmosfer (Friedlingstein dkk., 2023). Selama tiga dekade terakhir, deforestasi hutan tropis telah meniadakan sekitar dua pertiga manfaat yang diperoleh dari penyerap karbon global ( $2,2 \pm 0,5 \text{ Pg C tahun}^{-1}$ , 1990-2019; Pan dkk., 2024). Perbedaan efektivitas penyerap karbon hutan tropis di dalam dan di antara benua sangat jelas terlihat. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa, dari tahun 2001 hingga 2019, wilayah Amazon ( $5,14 \text{ juta km}^2$ ) merupakan penyerap karbon neto yang lemah ( $-0,03 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ), dengan serapan bruto ( $-0,4 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ) dan emisi bruto ( $0,3 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ). Angka ini hampir satu kali lipat lebih besar dari serapan bersih. Biomassa hidup Amazon di Brasil saja merupakan sumber karbon bersih ( $0,06 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ; Harris et al., 2021). Sebaliknya, Cekungan Kongo di Afrika yang lebih kecil ( $2,98 \text{ juta km}^2$ ) merupakan penyerap karbon yang jauh lebih kuat ( $-0,17 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ) dibandingkan dengan hutan Amazon, meskipun memiliki tingkat serapan bruto yang sama ( $-0,3 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ). Besarnya emisi bruto di Cekungan Kongo ( $0,14 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ) adalah sekitar setengah dari emisi di Amazon (Harris et al., 2021).

Memahami mekanisme yang mendorong perbedaan fluks karbon di seluruh wilayah hutan tropis untuk mengukur distribusi spasial temporal fluks karbon dan perannya dalam siklus karbon global, merupakan prioritas penelitian.

**Metana:** Metana di atmosfer ( $\text{CH}_4$ ) 25 kali lebih kuat sebagai GRK dibandingkan  $\text{CO}_2$  dan menyumbang sekitar 30% dari peningkatan kekuatan radiasi dari emisi antropogenik (Masson-Delmotte dkk., 2021). Daerah tropis menyumbang sekitar 65% dari total emisi  $\text{CH}_4$  global (antropogenik + alami) ke atmosfer ( $364 \text{ Tg CH}_4 \text{ thn}^{-1}$ ) (Saunio et al., 2024). Sekitar 40% dari total emisi  $\text{CH}_4$  dari daerah tropis berasal dari sumber lahan basah, dataran banjir, dan ekosistem air tawar

pedalaman ( $151 \text{ Tg CH}_4 \text{ yr}^{-1}$ ), yang mewakili sekitar 20% dari total anggaran  $\text{CH}_4$  global dan bertanggung jawab terhadap variabilitas antar tahun dalam laju pertumbuhan  $\text{CH}_4$  di atmosfer global (Feng dkk., 2022; Saunio dkk., 2024). Laju pertumbuhan  $\text{CH}_4$  di atmosfer akhir-akhir ini meningkat dengan cara yang tidak konsisten dengan pemahaman kita saat ini mengenai sumber dan penyerap  $\text{CH}_4$  global (Turner dkk., 2019). PANGEA akan mengeksplorasi siklus  $\text{CH}_4$  di seluruh wilayah tropis untuk mengembangkan model dan pemahaman yang lebih baik untuk berkontribusi pada opsi pengelolaan.

**Pengukuran  $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$  yang berasal dari satelit:** Pertukaran biosfer bersih (NBE) di wilayah tropis Amerika Selatan menunjukkan pemulihan karbon yang lebih lambat dari yang diperkirakan setelah El Niño 2015/2016, kemungkinan disebabkan oleh meningkatnya kekeringan dan defisit air (Liu dkk., 2024a). Sinyal dari tahun 2009 dan seterusnya menunjukkan adanya penyerap karbon yang persisten di lembah Kongo yang kontras dengan sumber emisi yang besar di bagian barat dan timur Afrika tropis (Palmer et al., 2019). Mengingat dampak global dari peningkatan GRK dan ketidakpastian pengukuran baru-baru ini, PANGEA akan menggunakan sensor canggih dan kolom turunan satelit yang lebih baik yang mengintegrasikan pengukuran  $\text{CO}_2$  ( $\text{XCO}_2$ ) dan  $\text{CH}_4$  ( $\text{XCH}_4$ ) yang digunakan dalam model atmosfer terbalik untuk membatasi anggaran  $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$  tropis (mis, Liu dkk., 2016; Lunt dkk., 2019; Crowell dkk., 2019; Palmer dkk., 2019; Yang dkk., 2021a; Liu dkk., 2020; Gaubert dkk., 2023; Wang dkk., 2023c; Liu dkk., 2024a; Byrne dkk., 2024). Proyek perbandingan model (MIP) OCO-2 baru-baru ini, yang didasarkan pada 14 model, menunjukkan sumber karbon bersih di timur laut Amazon dan Afrika tropis bagian utara, yang kontras dengan penyerap karbon bersih di bagian barat Amazon dan lembah Kongo (Byrne dkk., 2023). Emisi lahan basah tropis dari  $\text{CH}_4$  yang diperkirakan menggunakan pengambilan data satelit  $\text{XCH}_4$  dari GOSAT dan TROPOMI (misalnya, Parker dkk., 2018; Ma dkk., 2021; Feng dkk., 2022; Yu dkk., 2023) menunjukkan bahwa emisi lahan basah tropis 2023 menunjukkan bahwa emisi lahan basah dan perairan tropis telah diremehkan dibandingkan dengan inventarisasi  $\text{CH}_4$  berbasis darat (Yu dkk., 2023), meskipun prevalensi tutupan awan menghambat pengambilan data satelit (Ganesan dkk., 2019; Melack dkk., 2022). Dengan kemampuan deteksi emisi sumber titik metana yang berkembang pesat dengan menggunakan data hiperspektral yang kini tersedia (Hulley dkk., 2016; Růžička dkk., 2023), PANGEA akan menginvestigasi kemampuan untuk mendeteksi emisi metana alami dengan menggunakan sensor-sensor tersebut atau sensor dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi.

**Kebutuhan validasi:** Hasil inversi  $\text{CO}_2$  berbasis satelit tidak konsisten di daerah tropis. Sebagai contoh, hasil inversi atmosfer GOSAT dan OCO-2 secara konsisten menunjukkan sumber karbon yang signifikan di Afrika tropis bagian utara (Palmer et al., 2019), yang disebabkan oleh pelepasan karbon selama musim kemarau, ketika satelit-satelit tersebut memiliki cakupan wilayah yang bebas awan yang lebih konsisten. Di sisi lain, sebuah penelitian terbaru yang menggabungkan empat contoh pengukuran  $\text{CO}_2$  pesawat terbang dengan inversi berbasis satelit menunjukkan bahwa Afrika tropis bagian utara mendekati kondisi netral karbon (Gaubert et al., 2023). Temuan-temuan yang saling bertentangan ini menggarisbawahi kebutuhan mendesak akan penelitian tambahan untuk menyelesaikan perbedaan tersebut.

**Wawasan baru dari satelit:** Pengamatan satelit OCO-2/3 dan GOSAT telah memberikan wawasan baru mengenai siklus musiman dan variabilitas antar tahun dari siklus karbon tropis (Lei et al., 2024; Philip et al., 2022; Liu et al., 2017; 2024; Wang et al., 2023b). Menariknya, siklus musiman NBE di daerah tropis, seperti yang disimpulkan dari OCO-2, menunjukkan amplitudo yang jauh lebih besar daripada yang disimulasikan oleh model biogeokimia mutakhir. Hasil ini menunjukkan bahwa biosfer terestrial tropis

merespons variasi iklim musiman secara lebih dinamis daripada yang dipahami sebelumnya (Lei et al., 2024; Philip et al., 2020). Pengamatan satelit juga telah sangat meningkatkan pemahaman tingkat proses terhadap respons siklus karbon tropis terhadap variabilitas iklim antar tahun (Liu et al., 2017; 2024; Wang et al., 2023b). Sebagai contoh, Wang dkk. (2023b) menunjukkan bahwa variabilitas dalam penyimpanan air total mendorong heterogenitas spasial respons siklus karbon Amazon terhadap kekeringan tahun 2015-2016, sementara suhu memainkan peran yang lebih penting dalam memengaruhi variabilitas fluks karbon di seluruh wilayah tropis. Sebuah studi yang baru-baru ini diterbitkan (Stinecipher et al., 2022) menunjukkan bahwa pengamatan satelit terhadap karbonil sulfida (COS) memberikan batasan terhadap GPP regional Amazon yang konsisten dengan pengukuran lainnya, yang menunjukkan bahwa kuantifikasi yang disempurnakan terhadap fluks gas ini baik pada skala lokal maupun regional dapat meningkatkan estimasi GPP (Berry et al., 2013).

**Karbon dalam biomassa tanaman hidup:** Hutan tropis menyimpan hampir 50% dari total biomassa tanaman di atas tanah di ekosistem terestrial (Santoro et al., 2021). Jumlah dan pengolahan karbon dalam biomassa ditentukan oleh produktivitas primer bersih, yang menyeimbangkan penyerapan CO<sub>2</sub> dan emisinya dari tanaman dan beberapa mikroorganisme (Bonan 2008). Untuk memahami dampak perubahan iklim dan tata guna lahan di hutan tropis, sangat penting untuk mengukur struktur dan fungsi hutan tropis serta interaksi antara tanaman dan karbon di atmosfer. Biomassa hidup dan produktivitas sangat bervariasi dalam ruang dan waktu di seluruh hutan tropis (Sullivan dkk., 2020; Xu dkk., 2021a; Muller-Landau dkk., 2021; Wang dkk., 2023a, Sagang dkk., 2024a). Wilayah dengan curah hujan tinggi biasanya memiliki hutan yang lebat dan selalu hijau dengan cadangan karbon yang besar dan produktivitas yang tinggi, sementara wilayah dengan curah hujan musiman atau lebih rendah memiliki hutan yang sebagian atau seluruhnya meranggas dengan cadangan karbon dan produktivitas yang lebih rendah, serta lebih banyak variasi musiman pada fluks karbon (Malhi dkk., 2002; Bonan 2008; Muller-Landau dkk., 2021). Suhu juga memengaruhi siklus karbon hutan, baik secara langsung maupun melalui interaksi dengan ketersediaan air (Taylor et al., 2017; Muller-Landau et al., 2021). Perbedaan geomorfologi, iklim, komposisi spesies, dan fenologi di wilayah tropis dan di dalam wilayah tropis menyebabkan variasi laju fotosintesis, produktivitas kayu, respirasi, mortalitas pohon, dan fluks karbon di seluruh hutan tropis (Sullivan dkk., 2020; Muller-Landau dkk., 2021; Wang dkk., 2023a; Townsend dkk., 2008; Quesada dkk., 2010). Produktivitas primer bersih biasanya meningkat seiring dengan kesuburan tanah (Quesada dkk., 2012), meskipun tidak ada hubungan yang konsisten antara kesuburan tanah dan biomassa hidup, kemungkinan besar karena perputaran meningkat dan waktu tinggal kayu menurun seiring dengan kesuburan tanah (Muller-Landau dkk., 2021). Sayangnya, studi dinamika biomassa dan karbon berdasarkan pengukuran di lapangan hanya mewakili sebagian kecil dari kawasan hutan tropis, yaitu bagian kecil dan bias dari bentang alam tropis, sehingga menimbulkan pertanyaan mengenai kemampuan generalisasi temuan ini (Malhi et al., 2014; Marvin et al., 2014; Schimel et al., 2019; Hughes et al., 2021; Chapman et al., 2024). Rezim gangguan juga memainkan peran penting dalam membentuk dinamika hutan tropis, memengaruhi kematian pohon, perputaran biomassa, dan siklus karbon, yang dijelaskan lebih lanjut pada *Bagian 2.5*.

**Lahan basah tropis:** Penyumbang utama siklus karbon global adalah area hutan tropis yang luas yang merupakan lahan basah yang tergenang air secara permanen atau musiman, yang mencakup lahan gambut berhutan, rawa, dan dataran banjir (Aselmann dan Crutzen, 1989). Sebagai contoh, hutan dataran banjir Sungai Amazon mencakup wilayah seluas 250.000 km<sup>2</sup> dengan sebagian besar wilayah tergenang air selama enam bulan dalam setahun (Richey dkk., 2002; Goulding dkk., 2003). Dataran banjir Amazon merupakan sumber emisi CH<sub>4</sub> alami terbesar di daerah tropis dan menyaingi sumber emisi CH<sub>4</sub> dari Kutub Utara (Pangala dkk., 2017). Selain sumber CH<sub>4</sub> yang signifikan dari tanah yang

tergenang, batang pohon di dataran banjir Amazon menyumbangkan emisi  $\text{CH}_4$  yang diperkirakan 200 kali lebih besar dibandingkan dengan hutan basah beriklim sedang (Pangala dkk., 2017). Jumlah pengukuran dan cakupan fluks  $\text{CH}_4$  di daerah tropis sangat terbatas dibandingkan dengan daerah beriklim sedang dan boreal (Johnson dkk., 2022; Melack dkk., 2022; Stanley dkk., 2023). Emisi  $\text{CH}_4$  lahan basah hutan tropis dikendalikan oleh iklim, hidrologi, tutupan vegetasi, dinamika gangguan, dan praktik-praktik penggunaan lahan (Parker dkk., 2018; Ma dkk., 2021). Kurangnya pengukuran fluks karbon di lahan basah telah menyebabkan emisi  $\text{CH}_4$  lahan basah tropis dan sistem perairan pedalaman tidak dapat dikuantifikasi dengan baik (Ganesan dkk., 2019; Rosentreter dkk., 2021). Model mekanistik yang ada saat ini telah menghasilkan perbedaan besar dalam emisi  $\text{CH}_4$  tropis (Melton dkk., 2013; Bloom dkk., 2017) dan tidak menangkap musiman  $\text{CH}_4$  yang teramati di wilayah tropis yang didominasi oleh lahan basah berhutan (Melack dkk., 2022). Sebagian besar perbedaan ini disebabkan oleh kurangnya pengukuran skala kecil yang merinci pemicu emisi lahan basah dan akuatik (Melack dkk., 2022) dan perbedaan tiga kali lipat dalam tutupan lahan basah dan luasan genangan yang digunakan dalam masing-masing model (Peng dkk., 2022).

**Lahan gambut tropis:** Lahan gambut tropis yang kaya akan bahan organik menyimpan cadangan karbon terbesar dan dengan kepadatan tertinggi yang tidak dapat dipulihkan dalam rentang waktu pengambilan keputusan oleh manusia (Noon et al., 2021). Lahan gambut tropis menyimpan sekitar 100 Pg C, namun terdapat ketidakpastian yang besar dalam hal luasan spasial dan cadangan karbon yang terkandung di dalamnya. Sebagai contoh, cadangan karbon lahan gambut yang luas di Cekungan Kongo bagian tengah dan Cekungan Pastaza-Marañón Foreland di Amazon Peru baru-baru ini dipetakan dan menyumbang lebih dari sepertiga karbon yang tersimpan di lahan gambut tropis (Dargie dkk., 2017; Crezee dkk., 2022; Lahteenoja dkk., 2012). Kawasan lahan gambut yang tidak terdokumentasi secara substansial kemungkinan besar masih perlu dikaji (Hastie et al, 2024). Perubahan tata guna lahan, melalui deforestasi atau drainase, dan perubahan iklim mengancam kapasitas penyerapan karbon di lahan gambut tropis (Page dkk., 2022; Wang dkk., 2018). Di Asia Tenggara, drainase lahan gambut yang ekstensif telah mengubah lahan gambut di wilayah ini menjadi sumber  $\text{CO}_2$  yang setara dengan emisi bahan bakar fosil regional (Hoyt dkk., 2020). Kebakaran yang semakin meluas dan intens di lahan gambut, terutama di Asia ekuator dan selama tahun-tahun El Nino, juga telah menjadi sumber utama karbon, emisi gas rumah kaca lainnya, dan materi partikulat ke atmosfer (Page dkk., 2009; Yokelson dkk., 2022). Karena gangguan antropogenik terus mengancam lahan gambut tropis (Hastie dkk., 2022; Page dkk., 2022), maka pemahaman yang lebih baik mengenai distribusi, kerapatan cadangan karbon, dan emisi lahan gambut tropis sangat diperlukan (Roucoux dkk., 2017; Deshmukh dkk., 2021).

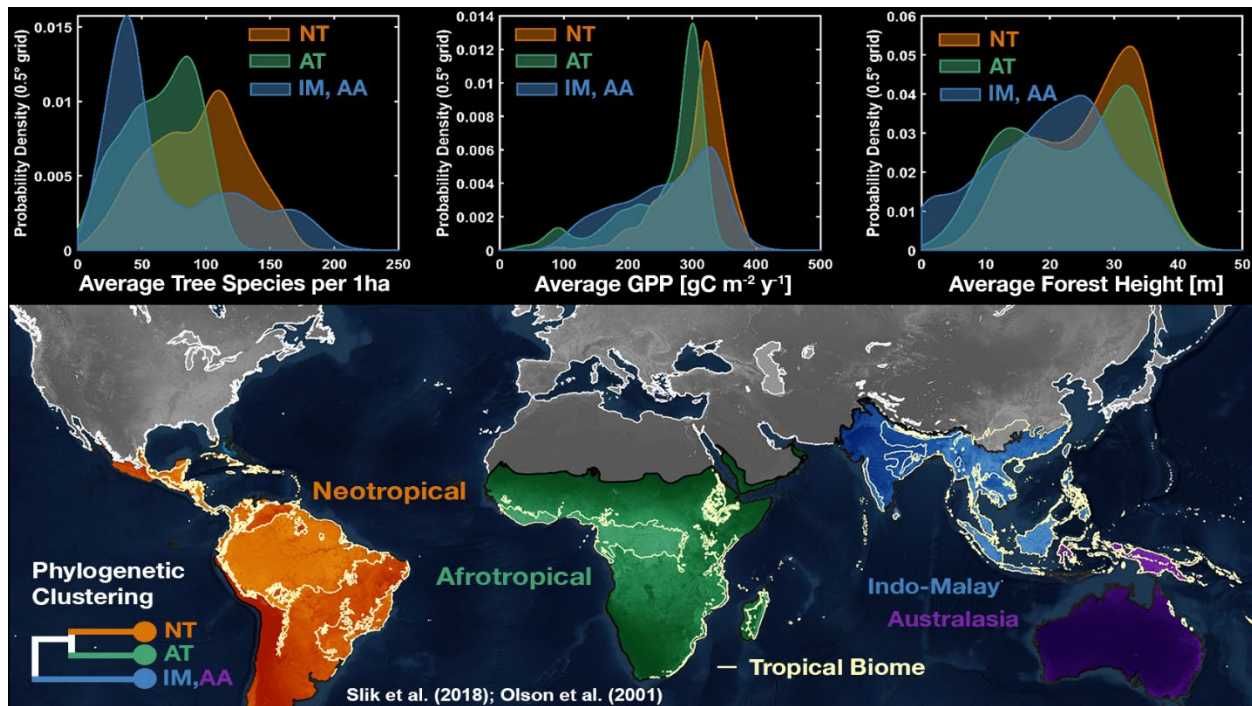
**Daur unsur hara:** Memproyeksikan produktivitas hutan tropis di masa depan bergantung pada pemahaman tentang interaksi antara ketersediaan unsur hara dari tanah, komposisi fungsional tanaman, dan dampak dari peningkatan suhu, konsentrasi  $\text{CO}_2$  dan kejadian-kejadian ekstrem. Ketersediaan unsur hara tanah yang biasanya rendah dari tanah tropis yang sangat lapuk diperkirakan akan menghambat pemupukan  $\text{CO}_2$  karena lebih banyak unsur hara yang terikat di dalam jaringan tanaman (Fleischer dan Terror, 2022). Fosfor kemungkinan akan membatasi potensi laju pertumbuhan hutan yang lebih tinggi sebagai respons terhadap peningkatan emisi  $\text{CO}_2$  sekitar setengahnya (Fleischer dkk., 2019; Braghiere dkk., 2022). Meskipun fosfor sebagian besar diasumsikan sebagai unsur hara yang paling membatasi di seluruh hutan tropis dataran rendah (misalnya Cunha dkk., 2022), pengamatan terbaru mengungkapkan heterogenitas pembatasan unsur hara di seluruh hutan tropis, termasuk pembatasan dan pembatasan bersama oleh nitrogen, fosfor, kalium, dan kalsium (Davidson dkk., 2004; Wright dkk., 2011; Manu dkk., 2022). Kalium memainkan peran penting dalam mengatur

respons tanaman terhadap kekeringan (Manu et al., 2024). Perubahan tata guna lahan selanjutnya dapat menyebabkan keterbatasan unsur hara dengan memindahkan unsur hara dalam jumlah besar (Bauters dkk., 2022; 2018; 2021, Kauffman dkk., 1995), yang menyebabkan redistribusi dan kehilangan unsur hara lokal. Penginderaan jarak jauh menawarkan peluang untuk menangkap dampak dari pasokan hara yang tersedia dan kehilangan hara akibat peristiwa gangguan melalui pengamatan variasi kimiawi daun, sifat fungsional, dan struktur kanopi dalam skala besar (Townsend et al., 2008, Chadwick dan Asner 2016b; 2018, Martins et al., 2018).

## 2.2 Keanekaragaman hayati

*Tema ilmu pengetahuan PANGEA ini akan menyelidiki bagaimana keanekaragaman hayati tropis bervariasi secara spasial dan temporal pada skala lokal, regional, dan benua, bagaimana keanekaragaman hayati membentuk fungsi ekosistem dan merespons perubahan iklim dan antropogenik, dan bagaimana keanekaragaman hayati tersebut berkontribusi pada heterogenitas ketahanan hutan, dan memberikan umpan balik terhadap iklim global dan sistem sosio-ekologi.*

**Keanekaragaman hayati tropis:** Keanekaragaman hayati adalah variabilitas di antara semua organisme hidup dan ekosistem, termasuk keanekaragaman taksonomi, filogenetik, fungsional, dan genetik di dalam dan di antara spesies, serta di dalam dan di antara lokasi. Hutan tropis merupakan bioma dengan keanekaragaman hayati paling tinggi di dunia berdasarkan semua ukuran tersebut dan merupakan rumah bagi lebih dari separuh spesies yang telah dideskripsikan di dunia (Lewis dkk., 2015; Barlow dkk., 2018; Dinerstein dkk., 2017; Pillay dkk., 2022). Tingginya jumlah spesies yang ditemukan di hutan tropis (keragaman gamma tinggi) mencerminkan jumlah spesies yang luar biasa di dalam lokasi (keragaman alfa), serta perputaran spesies yang substansial di antara lokasi (keragaman beta) (Condit dkk., 2002; Basset dkk., 2012; Jenkins dkk., 2013; Slik dkk., 2015). Pada skala kecil, variasi komposisi antar lokasi dalam keanekaragaman hayati tanaman sebagian besar mencerminkan penyaringan dan stokastik lingkungan (Condit dkk., 2002; Fyllas dkk., 2009; Condit dkk., 2013; Asner dkk., 2014a; Chadwick dan Asner, 2018). Sejarah evolusi yang berbeda dari benua tropis yang berbeda telah menghasilkan kumpulan spesies dan komposisi filogenetik yang sangat berbeda (Slik et al., 2018; **Gambar 12**). Keragaman taksonomi dan filogenetik hutan tropis yang tinggi disertai dengan keragaman fungsional yang tinggi, dengan spesies yang menunjukkan berbagai strategi sejarah kehidupan, sifat fungsional, dan respons lingkungan (Fyllas dkk., 2009; Condit dkk., 2013; Slot dan Winter 2017; Rüger dkk., 2018; Homeier dkk., 2021; Bialic-Murphy dkk., 2024).

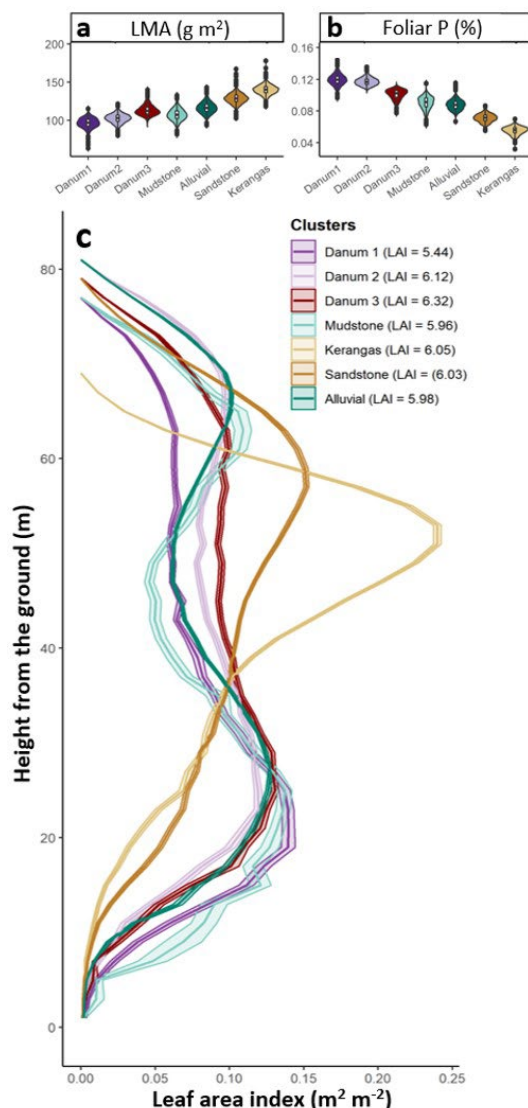


**Gambar 12.** Hutan tropis sangat bervariasi dalam hal struktur (ketinggian), fungsi (GPP), dan keanekaragaman di dalam dan di antara wilayah floristik utama (warna yang dipetakan), yang membentuk respons terhadap perubahan iklim dan penggunaan lahan. Kecerahan setiap warna menunjukkan GPP yang dipetakan. Sumber: Cavender-Bares dkk. (2022).

**Keanekaragaman fungsional, struktural, dan spesies:** Keanekaragaman hayati tropis sangat penting bagi berfungsinya ekosistem tropis dan umpan baliknya terhadap sistem bumi (Cardinale dkk., 2012; Dirzo dkk., 2014; Sakschewski dkk., 2016; Berzaghi dkk., 2018; Schmitt dkk., 2020). Spesies mana yang ada di suatu wilayah, serta sifat dan kelimpahannya, memengaruhi struktur, fungsi, ketahanan, dan interaksi hutan dengan iklim lokal dan global serta sistem sosial-ekologi (misalnya, Dirzo dkk., 2014; Del-Claro dan Dirzo 2021). Variasi yang luas dalam struktur dan fungsi ekosistem di antara hutan tropis terkait erat dengan variasi keanekaragaman hayati, yang mencerminkan tidak hanya pengaruh faktor lingkungan abiotik terhadap keanekaragaman hayati, struktur, dan fungsi, tetapi juga interaksinya yang kompleks (Muller-Landau dkk., 2021). Spesies dan komposisi fungsional tanaman berkayu, yang merupakan penyusun biomassa terbesar di atas permukaan tanah, sangat penting dalam membentuk struktur dan fungsi hutan,

yang pada gilirannya memengaruhi iklim mikro, habitat, dan sumber daya makanan bagi hewan dan mikroba. Memahami interaksi antara keanekaragaman fungsional, struktural, keanekaragaman spesies, dan dinamika siklus karbon sangat penting mengingat ketidakpastian apakah hutan tropis akan bertahan dan tetap menjadi penyerap karbon di sepanjang abad ke-21 (Arora dkk., 2020; Brienen dkk., 2015; Hubau dkk., 2020; Sabatini dkk., 2019). Keanekaragaman hayati fungsional yang tinggi menciptakan stabilitas dan ketahanan ekosistem yang lebih besar yang dapat membantu mengurangi dampak negatif perubahan iklim (Sakschewski et al., 2016; Longo et al., 2018; Schmitt et al., 2020). Perubahan rezim iklim dapat mengurangi keanekaragaman hayati yang dapat memberikan umpan balik terhadap iklim melalui penyerapan karbon yang lebih rendah (Thomas et al., 2004; Cavanaugh et al., 2014). Dalam sebuah tinjauan terhadap 258 studi tentang komunitas yang terbentuk secara alami,

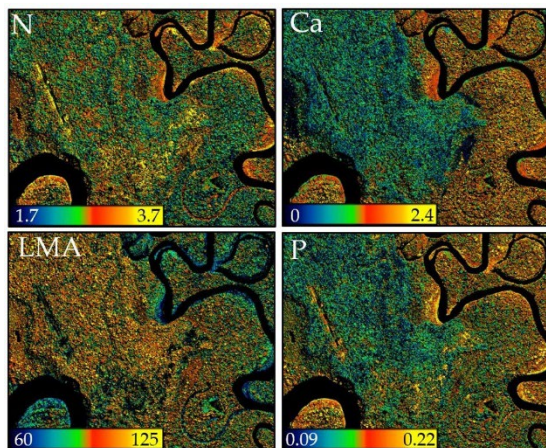
van der Plas (2019) menemukan bahwa, meskipun sebagian besar studi berfokus pada dampak keanekaragaman taksonomi, metrik keanekaragaman fungsional secara umum merupakan prediktor yang lebih kuat untuk fungsi ekosistem. Meskipun daerah tropis memiliki keanekaragaman spesies botani yang sangat besar, kelimpahan sebagian besar spesies rendah. Data plot inventarisasi hutan menunjukkan bahwa hanya 2% spesies di Amerika (174 spesies), Afrika (77 spesies), dan Asia Tenggara (172 spesies) menyumbang 50% dari pohon tropis di benua tersebut (Cooper et al., 2024). Karakterisasi keanekaragaman fungsional spesies hiperdominan ini dan interaksinya dengan taksa lain dapat dilakukan dan berada dalam cakupan PANGAEA.



**Gambar 13.** Variasi massa daun per area (LMA), fosfor daun (P), dan indeks luas daun vertikal (LAI) pada tujuh tipe hutan yang berbeda secara fungsional yang dipetakan menggunakan data VSWIR dan LIDAR dari udara di hutan tropis Malaysia (Ordway dkk., 2022).

#### Variabilitas dan pertukaran sifat tumbuhan berkayu:

Distribusi sifat fungsional tumbuhan berkayu merupakan manifestasi penting keanekaragaman hayati tropis yang memengaruhi struktur dan fungsi hutan (Li dan Prentice, 2024). Variasi bersama yang penting di antara sifat-sifat tersebut meliputi perawakan, sumbu cepat-lambatnya sejarah hidup tumbuhan, dan strategi memanjat versus strategi memanjat untuk mencapai kanopi. Perawakan dewasa berkisar dari semak kecil hingga pohon raksasa yang muncul di atas kanopi utama (Rüger et al., 2018; Maynard et al., 2022). Struktur hutan vertikal bervariasi dengan fungsi ekosistem bahkan ketika metrik yang terintegrasi secara vertikal seperti indeks luas daun (LAI) tidak (**Gambar 13**) (Ordway et al., 2022). Sumbu cepat-lambat mengacu pada spesies tanaman dengan akuisisi dan pemrosesan sumber daya yang cepat (terutama dalam hal efisiensi penggunaan hara), pertumbuhan yang cepat, kebutuhan sumber daya yang tinggi, tingkat kematian yang tinggi, dan toleransi terhadap naungan yang rendah, berlawanan dengan spesies yang



**Gambar 14.** Variasi *skala* lanskap dalam nitrogen (N), kalsium (Ca), massa daun per area (LMA), dan fosfor (P) di Amazon Peru. Gambar 15. Contoh peta sifat yang dibuat dari data spektroskopi pencitraan VSWIR dari (Chadwick & Asner, 2016). Tidak ada data jenis ini untuk Afrika Tengah.

memiliki akuisisi dan pemrosesan sumber daya yang lambat, pertumbuhan yang lambat, kebutuhan sumber daya yang rendah, tingkat kematian yang rendah, dan toleransi terhadap naungan yang tinggi (Reich 2014; Rüger dkk., 2018). Variasi dalam komposisi fungsional di antara ekosistem berkaitan dengan status suksesi hutan, produktivitas kayu, dan waktu tinggal kayu. Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa distribusi sifat yang terkait dengan kayu, daun, dan reproduksi dapat hampir ortogonal di seluruh spesies hutan tropis (Baraloto dkk., 2010; Fortunel dkk., 2012). Namun demikian, sumbu cepat-lambat masih mencakup variasi dalam sifat-sifat daun seperti massa daun per area (LMA) dan kandungan nutrisi daun (misalnya nitrogen, fosfor, dan kalsium). Kandungan nutrisi daun dan LMA dapat ditangkap dengan penginderaan jauh hiperspektral, sehingga memungkinkan kuantifikasi jarak jauh dari dimensi komposisi fungsional tanaman ini (**Gambar 14**) (Asner dkk., 2017; Chadwick dan

Asner 2016a). Penelitian terbaru juga mengeksplorasi keragaman fungsional dan tren redundansi di hutan tropis menggunakan citra multispektral (Aguirre-Gutiérrez et al., 2022).

**Liana, palem, dan bambu:** Meskipun sebagian besar penelitian di hutan tropis difokuskan pada pohon, bentuk-bentuk kehidupan tanaman lain seperti liana, palem, dan bambu memiliki dampak yang signifikan terhadap fungsi ekosistem, suksesi, dan respon terhadap gangguan. Sebagai contoh, liana (tanaman merambat berkayu) merupakan parasit struktural yang mengurangi pertumbuhan pohon dan meningkatkan kematian pohon melalui kompetisi, dan dengan demikian mengubah struktur dan fungsi hutan, serta cadangan karbon (van der Heijden et al., 2013; Muller-Landau dan Pacala 2020; Estrada-Villegas et al., 2022). Kelimpahan liana sangat bervariasi di antara hutan tropis terkait dengan iklim, sejarah gangguan, dan faktor lainnya (Dewalt dkk., 2015), dan rata-rata meningkat (Phillips dkk., 2002; Schnitzer dan Bongers 2011; Rueda-Trujillo dkk., 2024). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa liana mungkin rentan terhadap kekeringan (Nepstad dkk., 2007; Meunier dkk., 2021) dan disukai oleh meningkatnya tingkat gangguan (Schnitzer dan Bongers 2011, Schnitzer dkk., 2021), sementara peningkatan pertumbuhan pohon telah dikaitkan dengan peningkatan konsentrasi CO<sub>2</sub> di atmosfer (Phillips dkk., 2009, Brienens dkk., 2015). Sawit merupakan kelompok yang melimpah di hutan tropis yang lembab (ter Steege et al., 2013), dan beberapa spesies memiliki nilai budaya dan ekonomi yang relevan (Laureto dan Cianciaruso, 2017). Distribusi sawit di hutan tropis sangat bergantung pada iklim dan kondisi edafik (Emilio dkk., 2014; Muscarella dkk., 2020). Daya tahan sawit yang tinggi terhadap kerusakan akibat angin badai tropis mempengaruhi pemulihan hutan pasca gangguan (Uriarte et al., 2019; Zhang et al., 2022). Terdapat perbedaan yang mencolok dalam hal kelimpahan palem antar benua, di mana palem yang menyerupai pohon terdapat di mana-mana di Amerika, namun jarang ditemukan dibandingkan dengan palem yang tidak bertajuk dan memanjat pohon di Afrika (Muscarella et al., 2020). Bambu merupakan rumput tinggi yang tumbuh di berbagai habitat di seluruh wilayah tropis (Fadrique et al., 2020). Laju pertumbuhannya yang cepat, dikombinasikan dengan reproduksi klonal, memungkinkan bambu mendominasi lahan

yang luas, sehingga dapat menghambat suksesi hutan dan menurunkan akumulasi karbon hutan secara signifikan (Griscom dan Ashton 2003; Lima dkk., 2012), serta dapat menjadi invasif di lokasi introduksi (Montti dkk., 2014). Bambu dipanen secara ekstensif di hutan tropis karena alasan ekonomi, yang dapat berdampak pada fauna lokal yang bergantung pada hutan bambu sebagai sumber makanan (Sheil dkk., 2012). Liana, palem, dan bambu berbeda dengan pohon dalam hal ciri-ciri daun dan arsitektur tanaman, sehingga memungkinkan untuk mengukur kelimpahannya dengan penginderaan jarak jauh multispektral, hiperspektral, dan lidar (de Carvalho dkk., 2013; Dalagnol dkk., 2022; van der Heijden dkk., 2022).

**Fenologi daun:** Tanaman tropis menunjukkan strategi fenologi daun yang beragam, dari yang selalu hijau hingga gugur, dengan variasi dalam durasi, waktu, kelengkapan daun, dan apakah daun bersifat obligat atau fakultatif (Borchert, 1994; Eamus, 1999; Kushwaha dan Singh, 2005; Williams dkk., 2008; Kearsley dkk., 2024). Tingginya kebutuhan karbon yang diperlukan untuk pembilasan daun baru berarti bahwa sebagian besar spesies yang mengalami kekeringan di daerah tropis memiliki daun yang lebih tipis untuk mengurangi biaya konstruksi, dan kebutuhan hara yang tinggi untuk meningkatkan kapasitas fotosintesis pada musim tanam yang lebih pendek (Eamus dan Prior, 2001; Oliveira dkk., 2021a). Umur daun dan waktu musiman produksi daun juga merupakan faktor penting pada spesies yang selalu hijau dan meranggas, yang berimplikasi pada variasi musiman dalam kualitas daun dan kapasitas fotosintesis (Wu dkk., 2016; Lopes dkk., 2016; Wu dkk., 2017a,b; Albert dkk., 2018). Kelimpahan relatif dari strategi fenologi yang berbeda bervariasi secara sistematis di antara hutan tropis dalam kaitannya dengan iklim, geomorfologi, tanah, dan faktor lainnya (Condit dkk., 2000) dan berkontribusi penting terhadap variasi tingkat tegakan yang kuat pada fenologi daun dan reproduksi di berbagai lokasi (Bohlman, 2010; Guan dkk., 2015; Fisher dkk., 2020; Fadrique dkk., 2021; Yang dkk., 2021b). Fenologi daun juga sangat bervariasi antar tahun di dalam lokasi, yang berkontribusi pada variasi fungsi hutan antar tahun (Pau et al., 2010; Detto et al., 2018; Lamjiak et al., 2021). Pendorong iklim fenologi daun termasuk ketersediaan air dan cahaya. Banyak pohon, spesies, dan tegakan tropis menghidupkan pada waktu-waktu tertentu dalam setahun ketika mereka menerima paling banyak cahaya (lebih sedikit awan), bahkan ketika lebih banyak cahaya disertai dengan kondisi yang lebih kering (Wright dan van Schaik, 1994; Lopes dkk., 2016; Wagner dkk., 2017; Li dkk., 2021). Perubahan iklim jangka panjang, terutama di wilayah yang mengalami musim kemarau yang lebih panjang, dapat meningkatkan keunggulan kompetitif dan kelimpahan spesies yang mengalami kekeringan (Vico et al., 2017; Aguirre-Gutiérrez, 2019).

**Hewan dan mikroba:** Hewan dan mikroba juga mendorong fungsi ekosistem dan dipengaruhi oleh perubahan lingkungan global dengan cara-cara yang konsekuensi. Hewan dan mikroba berkontribusi pada jasa penting seperti penyerbukan, penyebaran benih, dan siklus hara, serta membentuk keanekaragaman hayati tanaman, serta struktur dan fungsi hutan, melalui interaksi yang bersifat mutualistik. Interaksi antara tumbuhan dan hewan juga dapat bersifat antagonis, misalnya melalui herbivora dan penyakit (Dirzo et al., 2014). Megafauna seperti gajah hutan (*Loxodonta cyclotis*) - yang saat ini ditemukan di Afrika, tetapi tidak di Amerika - memiliki dampak yang sangat penting terhadap struktur dan fungsi hutan karena penjelajahan dan gangguan fisik. Gajah juga membantu redistribusi nutrisi dan penyebaran biji-bijian besar, yang menghasilkan kelimpahan spesies pohon dengan kepadatan kayu tinggi di seluruh bentang alam (Berzaghi et al., 2018; 2019; Campos-Arceiz dan Blake, 2011). Eksperimen pelepasan vertebrata telah terbukti meningkatkan kepadatan tumbuhan bawah dan kelimpahan semai (Beck et al., 2013a; Camargo-Sanabria et al., 2015; Kurten dan Carson, 2015). Sebagian besar spesies pohon tropis dan sekitar separuh spesies liana (tumbuhan merambat berkayu) bergantung pada vertebrata untuk penyebaran biji, dengan sebagian besar spesies lainnya

bergantung pada angin (Muller-Landau dan Hardesty, 2005). Deforestasi hutan tropis akibat perburuan dan aktivitas manusia lainnya secara langsung mengancam regenerasi tanaman, dan dapat menggeser komposisi spesies tanaman dan dinamika siklus karbon (Wunderly, 1997; Estrada-Villegas et al., 2023). Deforestasi pada akhirnya dapat menyebabkan pergeseran ke arah penurunan cadangan karbon hutan (Brodie dan Gibbs, 2009; Jansen dkk., 2010; Bello dkk., 2015; Osturi dkk., 2016; Peres dkk., 2016). Di beberapa lokasi di Panama, misalnya, peningkatan defaunasi dikaitkan dengan pergeseran komposisi komunitas spesies pada lapisan semai, termasuk lebih banyak spesies yang disebarkan oleh angin dan air serta lebih banyak liana (Wright dkk., 2007; Kurten dkk., 2015).

## 2.3 Interaksi dan Umpan Balik Iklim

***Tema sains PANGEA ini akan menyelidiki umpan balik dan interaksi yang kompleks antara hutan tropis dan sistem iklim, serta bagaimana perubahan dalam proses-proses tersebut akan mempengaruhi dinamika penyerap/sumber karbon hutan tropis di masa depan.***

**Interaksi lahan dan atmosfer:** Interaksi lahan-atmosfer hutan tropis memodulasi cuaca dan iklim baik secara lokal maupun regional. Tanaman mendaur ulang curah hujan melalui evapotranspirasi dan memengaruhi permulaan dan waktu musim hujan (Wright dkk., 2017; Sori dkk., 2022; Worden dkk., 2021a; van der Ent dkk., 2010; Staal dkk., 2018; Dirmeyer dkk., 2009; Zemp dkk., 2017; Nyasulu dkk., 2024). Melalui emisi senyawa organik volatil biogenik, tanaman memengaruhi pembentukan awan, albedo, dan ketersediaan cahaya bagi vegetasi (Artaxo et al., 2022). Kanopi hutan juga mengatur albedo, fluks panas laten dan sensibel, serta kekasaran, yang mendorong umpan balik iklim biofisik (Bonan, 2008; Chen dkk., 2020; Lee dkk., 2011). Selain itu, keseimbangan energi dan air bergantung pada kelembapan tanah, yang dikendalikan oleh akar, tekstur tanah, dan geomorfologi (Fan dkk., 2017; Seneviratne dkk., 2010; Zhou dkk., 2021).

**Dampak cuaca dan iklim terhadap hutan tropis:** Sistem konvektif skala meso menghasilkan sebagian besar curah hujan di Afrika Tengah dan Amazon (Andrews dkk., 2024; Rehbein dkk., 2017; Negron-Juarez dkk., 2024). Badai, pada gilirannya, memengaruhi struktur hutan dan kematian pohon melalui tumbukan angin (misalnya, Negron-Juárez dkk., 2018; Feng dkk., 2023a), dan fungsi ekosistem, termasuk proses yang memengaruhi prevalensi spesies yang tahan terhadap badai (Uriarte dkk., 2019; Liu dkk., 2017). Hutan dataran rendah telah beradaptasi terhadap perendaman dan genangan air karena curah hujan menyebabkan siklus banjir (Alsdorf dkk., 2016; Hawes dan Peres 2016), yang dapat menurunkan ketersediaan oksigen, mengurangi fotosintesis, dan mengurangi konduktansi air (Parolin dkk., 2004; Parolin dkk., 2016; Hawes dan Peres 2016). Banjir juga menyebabkan peningkatan produksi CH<sub>4</sub> oleh mikroorganisme. Curah hujan juga memengaruhi siklus hara melalui pengendapan basah hara seperti nitrogen (Bauters et al., 2018, 2021), fotosintesis dan reproduksi melalui tutupan awan dan kabut (Philippon et al., 2019; Pohl et al., 2021), dan evapotranspirasi melalui pengendapan embun (mis., Gerlein-Safdi et al., 2018; Binks et al., 2019).

**Faktor pendorong variabilitas iklim antar tahun:** Iklim tropis secara langsung dipengaruhi oleh variasi suhu permukaan laut (SST), yang mengontrol transportasi energi lintas ekuator (Cook dan Vizzy 2015; Zhou dkk., 2019) dan memengaruhi pola curah hujan melalui perubahan zona konvergensi intertropis (ITCZ; Schneider dkk., 2014; Byrne dkk., 2018), angin muson (Cook dan Vizzy 2019), serta sistem dinamis berskala regional (Cook dan Vizzy 2019; Creese dkk., 2019; Montini dkk., 2019). Fenomena seperti El Niño-Southern Oscillation (ENSO), Osilasi Madden-Julian, Dipol Samudra Hindia, dan Sirkulasi Balik Atlantik Meridional menambah variabilitas tahunan dalam konveksi tropis (Raghavendra

dkk., 2020; Dias dkk., 2017; Gu dan Adler, 2018). Fase yang berbeda dari fenomena ini sangat terkait dengan kekeringan (Marengo dkk., 2016; Ndehedehe dkk., 2018; Jiménez-Muñoz dkk., 2016), musim kemarau yang lebih panjang (Jiang dkk., 2019; Staal dkk., 2020), serta pergeseran musim hujan dan intensifikasi badai (Taylor dkk., 2018; Rehbein dan Ambrizzi, 2023; Balaguru dkk., 2018). Respons terhadap pergeseran iklim bervariasi di berbagai wilayah. Hutan Afrika tampak kurang rentan terhadap kekeringan dibandingkan hutan Amazon (Tao dkk., 2022; Asefi-Najafabady dan Saatchi 2013; Saatchi dkk., 2012; Bennett dkk., 2021), dan hutan tropis yang lebih basah menunjukkan ketahanan terhadap perubahan iklim (Bennett dkk., 2023), meskipun konsekuensi dari kondisi yang lebih kering atau lebih bervariasi masih belum diketahui.

**Gangguan antropogenik berdampak pada cuaca dan iklim:** Aktivitas manusia dalam bentuk pembukaan hutan, pertanian, peternakan, dan kebakaran, berinteraksi dengan perubahan iklim untuk memberikan umpan balik yang signifikan terhadap siklus hidrologi terestrial (Li et al., 2022; Li et al., 2024). Hal ini mencakup perubahan di permukaan seperti debit sungai dan banjir (Ndehedehe dkk., 2022; Bogning dkk., 2022; Oliveira dkk., 2021b), serta perubahan perkembangan konvektif atau kondisi dinamis dan termodinamika lapisan batas atmosfer (Taylor dkk., 2022; Commar dkk., 2023; Sierra dkk., 2023; Wright dkk., 2017; Leite-Filho dkk., 2019; Jiang dkk., 2019). Perubahan dinamika atmosfer ini menyebabkan pergeseran aktivitas badai tropis, yang telah meningkat sebesar 5-25% per dekade selama setengah abad terakhir dan tampaknya akan terus berlanjut di masa depan (Taylor dkk., 2018; Raghavendra dkk., 2018; Lavigne dkk., 2019; Harel dan Price, 2020). Bersamaan dengan meningkatnya aktivitas badai, hutan tropis mengalami musim kemarau yang lebih panjang, tekanan air di atmosfer yang lebih besar, dan kekeringan yang lebih sering terjadi (Fang dkk., 2022; Boiser dkk., 2015; Duffy dkk., 2015; Trenberth dkk., 2014). Deforestasi dan degradasi hutan meningkatkan pemanasan permukaan tanah akibat penurunan pendinginan evaporasi (Devaraju et al., 2018; Li et al., 2015), dengan besarnya efek ini dipengaruhi oleh jumlah tutupan hutan yang hilang (Alkama dan Cescatti, 2016). Suhu yang lebih tinggi kemudian dapat meningkatkan respirasi pohon, yang mengurangi NPP dan mengubah cara hutan tropis dalam mendaur ulang karbon (Choury dkk., 2022; Das dkk., 2023; Liu dkk., 2017; Lloyd dkk., 2023). Deforestasi dan degradasi hutan dapat meningkatkan aliran sungai dan berdampak pada kualitas air akibat fluks sedimen (Levy et al., 2018), serta meningkatkan fluks panas yang masuk akal dan mengurangi evapotranspirasi dan infiltrasi (Costa et al., 2003; Souza-Filho et al., 2016; Longo et al., 2020; de Oliveira et al., 2021; Rangel-Pinagé et al., 2023). Tutupan lahan dan perubahan penggunaan lahan dapat memengaruhi pola curah hujan dengan mengubah heterogenitas permukaan dan memengaruhi fluks uap air dan panas di bagian hilir (Mahmood dkk., 2014; Snyder, 2010) serta siklus hara lintas-benua (Li dkk., 2021; Barkley dkk., 2019). Selain itu, pembakaran biomassa juga menyumbangkan aerosol yang memengaruhi pembentukan dan dinamika awan (Liu et al., 2020; Zhang et al., 2008; Chaboureaud et al., 2022; Tosca et al., 2015).

**Transisi kritis hutan tropis yang disebabkan oleh iklim:** Seiring dengan munculnya rezim iklim baru, pergeseran hutan tropis menjadi ekosistem kanopi terbuka dapat terjadi (Hirota dkk., 2011; Flores dkk., 2024). Namun, sensitivitas vegetasi berbeda di antara benua tropis, dan interaksi yang kompleks dengan perubahan lain, seperti peningkatan CO<sub>2</sub>, dapat mengubah respons vegetasi (Zhang dkk., 2015; Bartlett dkk., 2019). Sebagai contoh, hutan Afrika, khususnya di Afrika Barat, sering terpapar suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan hutan tropis yang relatif lebih sejuk dan lebih lembab di Asia Tenggara sehingga mungkin lebih beradaptasi terhadap tekanan panas (Malhi dkk., 2013). Namun, adaptasi ini mungkin mengorbankan hutan Afrika Barat yang beroperasi lebih dekat dengan ambang batas suhu kritis atau ambang batas hidrologis. Pada akhirnya, melampaui ambang batas iklim historis di wilayah tropis dapat menyebabkan pergeseran ke kondisi vegetasi alternatif di masa

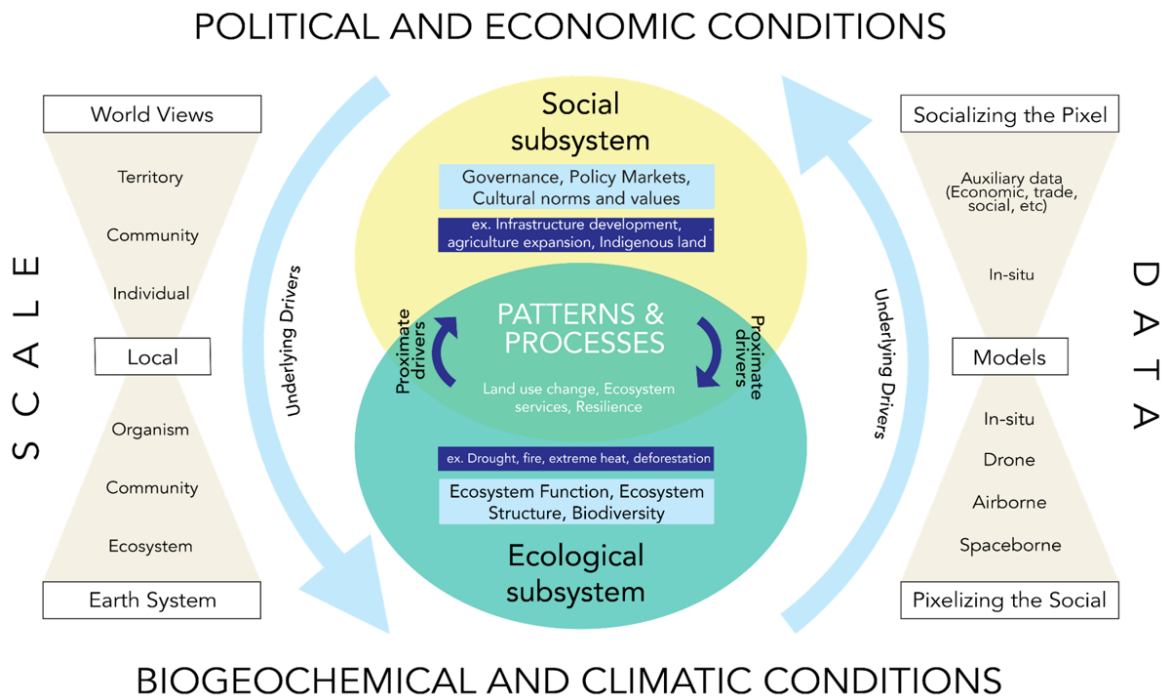
depan yang tidak mendukung jasa ekosistem hutan tropis kontemporer (Aguirre-Gutiérrez dkk., 2020; Flores dkk., 2024; Nobre dkk., 2016; Scheffer dkk., 2001).

**Efek umpan balik iklim-biosfir terhadap sumber daya air tawar:** Hutan tropis di seluruh dunia juga merupakan rumah bagi jaringan sungai dan aliran air yang luas, yang mencakup dua daerah aliran sungai terbesar, yaitu Amazon dan Kongo (Dai dan Trenberth, 2002). Namun, perubahan suhu dan curah hujan, bersama dengan perluasan deforestasi dan degradasi hutan mengubah siklus hidrologi di kedua wilayah tersebut. Sementara penurunan curah hujan mengurangi pasokan air tawar bruto di bagian atas kanopi, deforestasi dan degradasi hutan dapat meningkatkan pasokan air tawar ke sungai melalui kombinasi curah hujan aliran permukaan yang lebih tinggi dan evapotranspirasi yang lebih rendah (Davidson dkk., 2012). Dalam kasus lembah Sungai Amazon, penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa efek bersih dari perubahan iklim dan deforestasi secara spasial bersifat heterogen, dengan penurunan debit sungai di sub-lembah sungai dengan curah hujan yang tinggi atau tingkat deforestasi yang rendah, dan peningkatan di wilayah yang sangat terdampak oleh deforestasi (Coe dkk., 2011; Lima dkk., 2014; Arias dkk., 2018). Pergeseran siklus hidrologi pada sistem air tawar juga memengaruhi tingkat dan durasi banjir musiman di seluruh daerah aliran sungai, yang selanjutnya berdampak pada fluks CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> (Hamilton, 2010; Alsdorf dkk., 2016). Selain itu, perubahan tutupan hutan berdampak signifikan terhadap kualitas air, seperti perubahan konsentrasi nitrogen dan fosfor, pH air, ketersediaan oksigen, dan transparansi (Neill dkk., 2001; Ríos-Villamizar dkk., 2017). Dampak-dampak tersebut, ditambah dengan perubahan suhu akibat iklim dan hilangnya tutupan kanopi, dapat berdampak signifikan terhadap habitat air tawar dan komunitas tumbuhan, alga, dan hewan di sungai (Lorion dan Kennedy, 2009; Castello dan Macedo, 2016; Taniwaki dkk., 2017; Zeni dkk., 2019).

## 2.4 Sistem Sosial-Ekologi

*Tema sains PANGEA ini akan menyelidiki interaksi dan umpan balik antara sistem sosial dan ekologi yang berkaitan dengan produksi pangan dan ketahanan pangan, praktik budaya, mata pencaharian, strategi pengelolaan, dan ketahanan sistem tropis.*

**Sistem sosial-ekologi:** Untuk memahami sepenuhnya kompleksitas sistem sosial-ekologi (SES) hutan tropis dan bagaimana sistem tersebut terdampak oleh perubahan global, PANGEA mengambil pendekatan sistem yang memusatkan pada umpan balik dan interaksi antara manusia, iklim dan lingkungan (**Gambar 15**). Penelitian SES telah berkembang selama beberapa dekade terakhir untuk memahami dan memodelkan hubungan antara dan di dalam sistem sosial dan ekologi, yang mencakup kerangka kerja mata pencaharian berkelanjutan (Scoones 1998), subsistem dan interaksi SES (Ostrom 2009), ketangguhan SES (Folke 2006), ketahanan SES (Anderies et al, 2004), sistem gabungan manusia-alam (Liu et al., 2007), sosio-ekosistem (Swyngedouw 1999), jasa ekosistem (Costanza et al., 2017; Daily et al., 1997), kontribusi alam terhadap manusia (Díaz et al., 2018; Pascual et al., 2017), dan manfaat tambahan sosial-ekologis (Levis et al., 2024). Meskipun kerangka kerja ini mungkin berbeda dalam definisinya (Colding dan Barthel, 2019), kerangka kerja ini menyatukan prinsip dan variabel utama yang menggambarkan sistem sosial-ekologi, termasuk fokus utama pada interaksi dan umpan balik yang dapat memfasilitasi atau menghalangi perubahan dalam SES. Perspektif SES sangat penting terutama di daerah tropis di mana lahan dan hutan berada di bawah permintaan yang tinggi untuk memenuhi kebutuhan ketahanan pangan dan produksi, tujuan konservasi dan keanekaragaman hayati, serta mendukung mata pencaharian dan pembangunan lokal. Memahami dampak sosial dan ekologi dari pertukaran ini dan umpan balik yang membentuknya



**Gambar 15.** Pendekatan PANGEA terhadap SES akan menghubungkan faktor pendorong dan pendorong utama perubahan dalam sistem sosial dan ekologi di berbagai skala untuk memahami bagaimana interaksi di dalam SES berdampak pada kerentanan dan ketahanan hutan tropis.

diperlukan untuk mengembangkan pemahaman yang komprehensif tentang kekuatan yang membentuk kerentanan dan ketahanan hutan tropis dan untuk memandu strategi adaptasi dan pengelolaan yang efektif dan peka terhadap budaya.

**Pola dan pendorong perubahan penggunaan lahan:** Di seluruh wilayah tropis, pendorong dan pola perubahan penggunaan lahan yang berbeda secara regional, termasuk deforestasi, degradasi, dan pertumbuhan kembali hutan, memiliki potensi untuk memengaruhi ketahanan penyerap karbon tropis (Saatchi dkk., 2021; Hubau dkk., 2020). Di Amazon dan Asia Tenggara, deforestasi dan degradasi terutama didorong oleh perluasan pertanian skala besar berbasis komoditas untuk memenuhi permintaan dari pasar domestik dan internasional (Curtis et al., 2018; Haddad et al., 2024). Secara khusus, di Amazon, perubahan tata guna lahan terutama didorong oleh perluasan padang penggembalaan untuk ternak dan produksi kedelai untuk industri (Barlow dkk., 2018; Londres dkk., 2023). Perkebunan kedelai dan peternakan sapi mengubah siklus biogeokimia (misalnya, nitrogen dan fosfor), rezim hidrologi dan kebakaran, dan merupakan penyebab utama deforestasi (MapBiomas, 2023). Di Asia Tenggara, di mana perkebunan skala besar berkembang pesat dengan mengorbankan hutan primer dan lahan gambut, perubahan penggunaan lahan sebagian besar didorong oleh permintaan global akan minyak kelapa sawit (Koh dan Wilcove, 2008). Pada tahun 2020, ekspansi kelapa sawit diperkirakan menyumbang 20% emisi karbon di kawasan ini (Carlson et al., 2013). Peningkatan mata pencaharian petani kecil dari ekspansi kelapa sawit di Indonesia telah terbukti menghasilkan pengorbanan langsung terhadap fungsi ekosistem (Clough et al., 2016). Berbeda dengan Amazon dan Asia Tenggara, sebagian besar perubahan penggunaan lahan di Lembah Kongo berskala kecil dan didorong oleh perluasan pertanian subsisten dan pertanian komoditas lokal yang sangat besar (Tyukavina dkk., 2018). Permintaan kakao dan kayu yang terus meningkat terus membentuk perubahan penggunaan lahan di Afrika tropis, meskipun perubahan penggunaan lahan skala kecil dan berbasis subsisten masih memainkan peran yang sangat besar dalam mendorong perubahan penggunaan lahan (Hosonuma dkk., 2012; Kamath dkk., 2024; Fuller dkk., 2019). Sebagai contoh, meskipun tanaman komoditas seperti kelapa sawit telah berkembang di seluruh Afrika tropis sejak tahun 1990-an, ekspansi ini terkait dengan permintaan domestik dan dipenuhi oleh petani kecil dan sistem pasar informal (Ordway et al., 2017a; Ordway et al., 2017b). Namun, sejauh mana skala, intensitas, dan bentuk perubahan penggunaan lahan yang berbeda di antara benua tropis berdampak pada keanekaragaman hayati dan lintasan siklus karbon yang berbeda, masih kurang dipahami.

**Interaksi umpan balik:** Dalam sistem sosial-ekologi tropis, umpan balik antara manusia dan sistem bumi memainkan peran penting dalam menjaga ketahanan dan memandu lintasan sistem terintegrasi ini (Dearing et al., 2010). Dinamika sistem sosial-ekologi di hutan tropis melibatkan umpan balik dengan kombinasi kekuatan terdekat dan kekuatan yang mendasarinya, termasuk kebijakan dan/atau insentif berbasis pasar, kerangka kerja peraturan, akses atau hambatan terhadap informasi dan sumber daya, dan hubungan yang telah berlangsung lama antara masyarakat lokal, masyarakat adat, dan ekosistem hutan (Geist dan Lambin, 2002; Lambin dkk., 2003). Pemicu perubahan ini tidak hanya membentuk dinamika ekologi, termasuk siklus karbon dan air, interaksi tanaman-hewan, serta sistem cuaca dan iklim, tetapi juga pada subsistem sosial (**Gambar 15**), termasuk ketahanan pangan dan mata pencaharian lokal (Sonwa dkk., 2012; Flores dkk., 2024). Selain itu, pendorong perubahan membentuk umpan balik dan interaksi antara subsistem sosial dan ekologi, melalui perubahan, misalnya, penggunaan dan tutupan lahan, ketahanan ekosistem, dan rezim kebakaran (Whitfield et al., 2019; Gatti et al., 2023). Umpan balik antara manusia dan hutan tropis terkait erat melalui penyediaan jasa ekosistem serta kegiatan konservasi dan pengelolaan, di mana, misalnya, pengumpulan hasil hutan non-kayu seperti biji, daun, buah, dan akar dapat berperan penting dalam mendukung mata

pencapaian dan budaya masyarakat hutan tropis. Meskipun interaksi ini terjadi di seluruh wilayah tropis, kondisi politik, ekonomi, budaya, dan pengelolaan yang spesifik secara lokal memengaruhi respons, ketahanan, dan adaptasi hutan tropis dan masyarakat setempat terhadap dinamika perubahan global (Saatchi et al., 2021; Geist dan Lambin, 2002; Turner, 2014).

**Dampak terhadap kerentanan dan ketahanan:** Aktivitas manusia menciptakan umpan balik yang kompleks antara sistem sosial dan ekologi, yang menghasilkan serangkaian dampak lingkungan dan sosial (Lambin & Meyfroidt, 2010). Pemahaman yang lebih baik mengenai tidak hanya umpan balik yang memperkuat kerentanan, tetapi juga umpan balik yang meningkatkan ketahanan hutan tropis sangat penting untuk mengembangkan rencana pengelolaan berbasis tempat dan peka budaya yang mendukung ketahanan ekosistem dan mata pencaharian masyarakat. Salah satu contohnya adalah penelitian terbaru yang berfokus pada 'titik harapan' sosial-ekologis-didefinisikan sebagai area yang dapat memberikan dampak signifikan terhadap ketahanan sosial-ekologis, di mana masyarakat lokal dan keterlibatan publik dapat dikombinasikan secara strategis dengan ilmu pengetahuan, teknik, dan teknologi, termasuk penginderaan jarak jauh, untuk memberikan dampak terbesar dalam konservasi keanekaragaman hayati yang rentan (Levis, dkk., 2024). Para penulis menyoroti contoh Xingu Atas, yang terletak di busur deforestasi Amazon, Brasil, di mana kelompok-kelompok masyarakat adat seperti Kuikuro telah memperkaya keanekaragaman hayati melalui pengelolaan lanskap selama ribuan tahun, termasuk penciptaan tanah antropogenik, domestikasi beragam tanaman, dan penanaman hutan budaya, yang menunjukkan praktik budaya dan pengelolaan yang mendorong ketahanan hutan (Levis, dkk., 2024). PANGEA menawarkan kesempatan untuk memperluas penelitian serupa di tempat lain di wilayah tropis melalui kolaborasi yang adil dan produksi bersama dengan masyarakat adat dan lokal untuk mengidentifikasi praktik-praktik yang mendorong sistem tangguh yang bermanfaat bagi alam dan manusia, termasuk praktik-praktik yang berpotensi untuk ditingkatkan. Masih banyak pekerjaan yang harus dilakukan untuk mengidentifikasi metode dan praktik yang sesuai dengan budaya untuk mengintegrasikan penginderaan jarak jauh dan ilmu pengetahuan Masyarakat Adat.

**Implikasi sistem sosial-ekologi:** Wilayah tropis merupakan rumah bagi banyak masyarakat adat dan lokal yang mata pencahariannya terkait erat dengan kesehatan lingkungan sekitarnya. Dengan memahami siklus umpan balik antara aktivitas manusia dan fungsi ekosistem, masyarakat di skala lokal hingga global dapat membuat keputusan yang lebih tepat mengenai penggunaan lahan, pengelolaan sumber daya, dan upaya konservasi yang selaras dengan ketahanan ekologi dan kebutuhan sosial-ekonomi mereka (Aguiar dkk., 2020). Para pengambil keputusan di tingkat daerah dan nasional juga dapat menggunakan informasi ini untuk menyusun kebijakan yang menyeimbangkan tujuan pembangunan dengan konservasi keanekaragaman hayati dan jasa ekosistem, sehingga manfaat ekosistem ini dapat dinikmati secara adil dan berkelanjutan bagi generasi mendatang (Pörtner et al., 2021). PANGEA akan memajukan penelitian mengenai umpan balik sosial-ekologi di daerah tropis untuk meningkatkan pemahaman dan memungkinkan prediksi yang lebih akurat mengenai dampak jangka panjang dari tindakan manusia. Penelitian ini sangat penting untuk meramalkan lintasan masa depan penyerap karbon tropis, hilangnya spesies, perubahan layanan ekosistem, dan ketahanan ekosistem ini terhadap tekanan eksternal (Leclère et al., 2020). Prediksi yang akurat diperlukan untuk mengidentifikasi potensi titik kritis, di mana perubahan kecil atau kelanjutan tren penggunaan dan pengelolaan lahan dapat menyebabkan pergeseran rezim yang tidak dapat dipulihkan, dan untuk merancang intervensi yang dapat mencegah atau memitigasi hasil tersebut (Staal dkk., 2020; Liu dkk., 2024b; Flores dkk., 2024). Kemajuan dalam pemahaman, metode, dan kemampuan pemantauan dari PANGEA berpotensi memberdayakan Masyarakat Adat, masyarakat lokal, dan pengambil keputusan dengan informasi yang mereka butuhkan untuk mengatur dan terlibat dengan ekosistem ini secara

lebih berkelanjutan. Pada akhirnya, kemampuan untuk memprediksi dan mengelola umpan balik yang kompleks dalam ekosistem tropis merupakan kunci untuk membina ketahanan lingkungan dan sosial di wilayah-wilayah kritis ini.

**Dampak global dari hutan tropis:** Dampak hutan tropis juga meluas jauh melampaui daerah tropis. Masyarakat di Amerika Serikat dan di seluruh dunia terkena dampak dari interaksi antara daratan dan atmosfer tropis dan juga menjadi agen perubahan bagi iklim dan ekosistem tropis, misalnya melalui pola konsumsi, gaya hidup, dan perubahan tata guna lahan. Amazon memainkan peran penting dalam menstabilkan sistem iklim di seluruh Amerika, dan deforestasi Amazon mengancam pola curah hujan di Amerika Serikat yang dapat menyebabkan penurunan curah hujan sebesar 20% di seluruh wilayah barat laut Amerika Serikat dan penurunan salju di Sierra Nevada di California sebesar 50%, yang merupakan sumber air bagi pertanian dan daerah perkotaan yang menjadi tumpuan seluruh wilayah Amerika Serikat (Medvigy dkk., 2013). Jika pola curah hujan di wilayah Midwest, Northwest, dan sebagian wilayah Selatan AS terganggu, maka hal ini akan menimbulkan risiko serius bagi pertanian dan sumber daya air di AS (Lawrence dan Vandecar, 2015). Deforestasi Amazon dapat menyebabkan penurunan curah hujan sebesar 20% di wilayah barat laut AS dan penurunan salju di Sierra Nevada di California sebesar 50%, yang merupakan sumber air bagi pertanian dan daerah perkotaan yang menjadi tumpuan seluruh wilayah AS (Medvigy dkk., 2013). Perubahan curah hujan tersebut, dikombinasikan dengan pergeseran sirkulasi atmosfer, akan menekan ketersediaan air, mengurangi hasil panen, dan mengganggu kestabilan ekosistem dari Dataran Tengah AS hingga Pantai Barat, yang berpotensi menimbulkan masalah ketahanan pangan. Hilangnya hutan Amazon dan degradasi menimbulkan ancaman langsung dan serius bagi pertanian, sumber daya air, dan stabilitas masyarakat AS. Selain peran hutan tropis dalam mengatur iklim global, banyak tanaman komoditas utama yang ditanam terutama atau seluruhnya di daerah tropis, termasuk kakao, kopi, kelapa sawit, dan karet. Sejumlah spesies kayu juga hanya ditemukan di daerah tropis (Romero et al., 2017). PANGEA akan mengkaji perubahan luas penggunaan lahan untuk mendukung tanaman dan pemanenan kayu tersebut terhadap deforestasi dan perubahan iklim tropis, serta mempertimbangkan strategi adaptasi dan mitigasi.

## 2.5 Dinamika Gangguan

***Tema Sains PANGEA ini akan menyelidiki bagaimana rezim gangguan mengubah umpan balik siklus biogeokimia melalui iklim, keanekaragaman hayati, dan siklus hidrologi.***

**Dinamika gangguan di daerah tropis:** Terdapat dua rezim gangguan hutan utama: (1) gangguan langsung oleh manusia yang diakibatkan oleh tutupan lahan dan perubahan tata guna lahan, seperti deforestasi, degradasi, pengembangan pertanian, dan kebakaran yang disulut oleh manusia, dan (2) gangguan alami yang sebagian besar terkait dengan suhu tinggi, tekanan air, badai, agen biotik, dan penyalan api secara alami, yang diperparah secara tidak langsung oleh tindakan manusia yang berkontribusi terhadap perubahan iklim. Kedua rezim gangguan ini berkontribusi sangat besar terhadap total pergantian hutan dan emisi karbon dari hutan tropis (McDowell et al. 2020, Qin et al., 2021), tetapi memiliki distribusi spasial, intensitas, frekuensi, dan konsekuensi yang berbeda untuk wilayah tropis. Di Busur Deforestasi Brasil, degradasi hutan melalui penebangan dan kebakaran menyebabkan lebih banyak kehilangan karbon dibandingkan dengan pembukaan hutan pada tahun 2016-2018 (Csillik et al., 2024). Dampak badai angin terhadap kehilangan karbon hampir sama besarnya dengan kebakaran, dan lebih besar daripada penebangan (Csillik dkk., 2024; Urquiza-Muñoz dkk., 2024; Esquivel-Muelber dkk., 2020). Dampak perubahan frekuensi dan tingkat kekeringan dan badai, peningkatan suhu, serta deforestasi dan degradasi sangat bervariasi di antara ekosistem dan dapat berdampak pada kematian pohon, evapotranspirasi, respirasi ekosistem, komposisi spesies, dan masih banyak lagi. Secara kritis, interaksi di antara berbagai gangguan dapat bersifat multiplikatif, bukan aditif, yang berarti bahwa kita perlu secara eksplisit mengukur dampak dan interaksinya untuk memahami efeknya. Contohnya adalah kekeringan yang memperkuat dampak kebakaran (Brando dkk., 2014), deforestasi yang memperkuat angin (Schwartz dkk., 2017), dan liana yang memperkuat petir (Gora dkk., 2023). PANGEA akan mengukur dampak gangguan di seluruh gradien keanekaragaman hayati, iklim, edafik, dan tata guna lahan untuk memahami konsekuensi individual dan multiplikatifnya.

**Gangguan langsung dari manusia:** Selama beberapa dekade terakhir, gangguan langsung dari manusia telah menjadi risiko utama bagi keberlangsungan dan fungsi hutan tropis. Manusia membuka lahan hutan tropis yang sangat luas setiap tahunnya dan menyebabkan degradasi melalui penebangan, perburuan, dan kebakaran. Gangguan langsung oleh manusia biasanya melibatkan dampak yang intens dan bertahan lama, seperti penghilangan biomassa secara ekstensif, defaunasi, dan konversi lahan menjadi ekosistem non-hutan (Lewis 2015; Gibson dkk., 2011; Wearn dkk., 2012; Brodie dkk., 2014; Silva Junior dkk., 2020; Brando dkk., 2014; Flores dkk., 2024). Penginderaan jarak jauh satelit telah merevolusi deteksi dan kuantifikasi cepat gangguan langsung oleh manusia dan memungkinkan pemahaman yang lebih dalam tentang penyebabnya (lihat *Bagian 2.4*). Deforestasi dan perubahan tutupan lahan saat ini secara aktif dipetakan dengan resolusi spasial tinggi di seluruh wilayah tropis dan dikaitkan dengan sektor dan praktik tertentu yang mendorong tren tersebut (Curtis dkk., 2018; Maxwell dkk., 2019; Qin dkk., 2021; Harris dkk., 2021; Lapola dkk., 2023; McGregor dkk., 2024; Csillik dkk., 2024). Dengan munculnya array satelit kecil (misalnya, PlanetScope), kini juga memungkinkan untuk mengukur deforestasi dan degradasi di beberapa sistem dalam hitungan hari hingga bulan (Welsink dkk., 2023; Dalagnol dkk., 2023). Kemajuan ini telah menunjukkan bahwa degradasi berkontribusi sama besarnya, atau bahkan lebih besar, daripada deforestasi terhadap total rezim gangguan hutan tropis (Maxwell dkk., 2019; Qin dkk., 2021), sehingga menyoroti pentingnya data resolusi tinggi dan frekuensi tinggi untuk memahami dan memantau dinamika ini. Meski demikian, interaksi antara deforestasi dan degradasi serta faktor-faktor seperti siklus hidrologi, kondisi

mikrometeorologi, interaksi spesies, dan siklus biogeokimia masih belum dipahami dengan baik, terutama di Afrika tropis.

**Kebakaran:** Di hutan tropis lembap, dinamika kebakaran sering kali berinteraksi dengan deforestasi dan degradasi, di mana kebakaran yang terjadi secara alami masih jarang terjadi, sementara kebakaran yang disulut oleh manusia merupakan hal yang umum terjadi (Uhl dan Kaufmann, 1990; Cochrane, 2003; Brando dkk., 2019a). Dari tahun 2003-2018 di hutan tropis lembap, diperkirakan  $41 \pm 14\%$  dari seluruh kehilangan hutan disebabkan oleh kebakaran, meskipun angka ini sangat bervariasi di setiap benua (van Wees et al., 2021). Dari seluruh kehilangan hutan tropis terkait kebakaran selama periode tersebut, 69% terjadi di Amerika tropis, 22% di Asia Tenggara, dan hanya 8% di sub-Sahara Afrika (van Wees et al., 2021). Meskipun kebakaran dikaitkan dengan deforestasi, dampak penurunan deforestasi di Amazon sejak tahun 2005 terhadap aktivitas kebakaran masih belum dapat dipastikan. Beberapa studi menunjukkan adanya keterkaitan antara kebakaran dan deforestasi (Aragão dkk., 2018), sementara studi lainnya melaporkan adanya penurunan aktivitas kebakaran (misalnya, Andela dkk., 2017; Libonati dkk., 2021). Di Afrika, telah terjadi peningkatan kehilangan hutan tropis akibat kebakaran, tetapi sebagian besar kebakaran di wilayah tersebut kemungkinan besar tidak terdeteksi (Wimberly et al., 2024). Kebakaran yang disulut oleh manusia umumnya menyebar ke bagian bawah hutan tropis yang masih utuh, yang menyebabkan kematian pohon dan membuat hutan lebih rentan terhadap gangguan yang disebabkan oleh angin (Barlow dkk., 2003; Brando dkk., 2014; Silvério dkk., 2019; Berenguer dkk., 2021b). Perubahan struktur hutan yang terkait dengan kebakaran dan fragmentasi hutan dapat meningkatkan risiko kebakaran berikutnya, baik melalui peningkatan kelimpahan bahan bakar seperti rumput dan tumbuhan bawah (Silvério dkk., 2013; Sagang dkk., 2024b) maupun radiasi matahari yang lebih tinggi yang mencapai permukaan tanah, yang menyebabkan kondisi yang lebih panas dan lebih kering di dekat permukaan (Brando dkk., 2014; Longo dkk., 2020; Nunes dkk., 2022). Selain itu, kekeringan periodik memperkuat dampak kebakaran dengan meningkatkan sifat mudah terbakarnya bahan bakar, sehingga peningkatan kekeringan parah akibat iklim diperkirakan akan meningkatkan dampak kebakaran (Alencar dkk., 2006; Brando dkk., 2014, 2019a; Barbosa, 2024; Burton dkk., 2024a, b; da Veiga dkk., 2024; Jones, 2024). Kebakaran memindahkan nitrogen ekosistem ke atmosfer melalui proses pirodenitrifikasi yang berakibat pada pemiskinan nitrogen, sehingga menurunkan laju regenerasi vegetasi (Davidson dkk., 2007). Pengukuran satelit dan pengukuran di lapangan telah mengungkap dampak kebakaran yang meluas dan kontribusi besar kebakaran terhadap siklus karbon pantropis (Cochrane 2001; Berenguer et al., 2021a). Melalui pengukuran di lapangan yang terkoordinasi dan dilakukan secara bersama-sama serta pengamatan satelit dan udara yang canggih, PANGAEA akan secara signifikan meningkatkan pemahaman mengenai dinamika kebakaran dan dampaknya.

**Dinamika gangguan alam:** Gangguan alam - terutama kekeringan, badai, dan agen biotik - menghadirkan tantangan yang berbeda dalam hal deteksi, kuantifikasi, dan atribusi dibandingkan dengan gangguan langsung oleh manusia seperti deforestasi dan degradasi hutan - meskipun pada dasarnya deforestasi tidak dapat dideteksi dengan menggunakan penginderaan jarak jauh. Sebagian besar gangguan alami terjadi pada skala spasial temporal yang kecil, dengan lebih dari 98% kematian biomassa akibat tumbang pohon di Amazon disebabkan oleh peristiwa yang terjadi pada area kurang dari 0,1 hektar (Espírito-Santo dkk., 2014). Namun, kejadian gangguan kecil secara kolektif dapat menyebabkan sekitar 1,5-2% perputaran biomassa setiap tahunnya, yang mengindikasikan bahwa gangguan alami melepaskan setara dengan seluruh cadangan karbon hutan tropis setiap 50-75 tahun (Galbraith dkk., 2013; Espírito-Santo dkk., 2014). Gangguan alam juga dapat sangat bervariasi dalam ruang dan waktu (Galbraith dkk., 2013; Sullivan dkk., 2020; Hubau dkk., 2020; Dalagnol dkk.,

2021, Csillik dkk., 2024, Negron-Juarez dkk., 2023), dengan pendorong yang berbeda di berbagai wilayah dan bukti kuat bahwa rezim gangguan alami bergeser seiring dengan perubahan iklim (Gloor dkk., 2013; McDowell dkk., 2018, Gora dkk., 2020a; Sullivan dkk., 2020, Gora dan Esquivel-Muelbert, 2021, Fang dkk., 2022). Mengingat kontribusinya yang luar biasa terhadap dinamika siklus karbon hutan tropis-misalnya di Amazon Brasil, gangguan alam menyumbang lebih dari 50% dari total kehilangan karbon biomassa (Csilik dkk., 2024)-perubahan kecil dalam rezim gangguan alam akan berdampak pada fungsi hutan tropis, keanekaragaman hayati, dan anggaran karbon global.

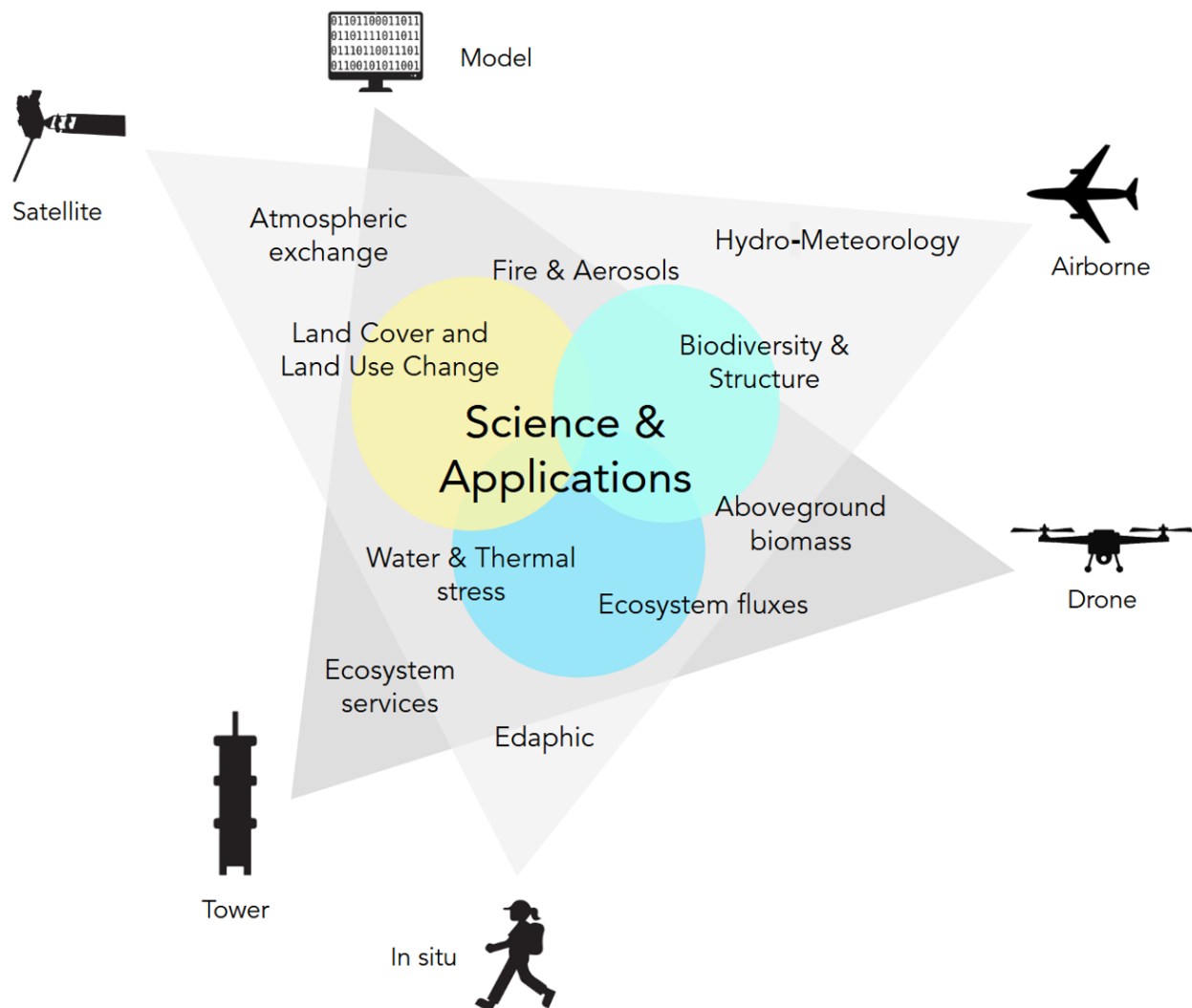
**Kekeringan:** Peristiwa kekeringan merupakan penyebab utama gangguan alami di hutan tropis. Tekanan air di atmosfer yang terkait dengan suhu tinggi dan defisit tekanan uap telah meningkat dalam beberapa dekade terakhir (Fang dkk., 2022), dan kekeringan episodik terjadi dengan tingkat keparahan dan frekuensi yang lebih tinggi (Boiser dkk., 2015; Duffy dkk., 2015; Trenberth dkk., 2014). Cekaman air terkait kekeringan dikaitkan dengan peningkatan kematian pohon dan penurunan pertumbuhan pohon, yang dapat dideteksi dalam plot inventarisasi hutan dan penginderaan jauh satelit (Phillips dkk., 2009; Saatchi dkk., 2013; Qie dkk., 2017; Hammond dkk., 2022; Bauman dkk., 2022; Bennett dkk., 2023; Chen dkk., 2024). Penelitian fisiologis dan anatomis yang mendetail telah mengungkap banyak hal mengenai mekanisme yang mendasari ketahanan hutan terhadap tekanan air (McDowell dkk., 2008; McDowell 2011; Trugman dkk., 2018; Smith-Martin dkk., 2023; Tavares dkk., 2023). Penelitian kekeringan di hutan tropis memberikan bukti kuat akan pentingnya kekeringan, tetapi juga mengungkapkan bahwa dampak kekeringan sangat bervariasi di antara ekosistem. Sebagai contoh, El Niño 2015-2016 memiliki dampak yang kuat di Amazon (Bennett dkk., 2023), tetapi hanya memiliki dampak marjinal di hutan tropis Afrika (Bennett dkk., 2021) dan menyebabkan peningkatan substansial pada GPP di Panama tengah (Detto dan Pacala, 2022). Meskipun perbedaan antara tahun-tahun kekeringan dan non-kekeringan terlihat jelas, kontribusi kekeringan terhadap tren dekadal dalam dinamika hutan dan lintasan masa depan hutan tropis masih sangat tidak pasti.

**Badai:** Badai tropis (dinamakan badai, siklon, atau topan tergantung pada lokasi geografisnya) semakin meningkat intensitasnya dan merupakan bentuk gangguan yang dominan di hutan tropis pesisir 10° utara dan selatan khatulistiwa (Hoyos dkk., 2006; Lugo 2008), meskipun badai ini memainkan peran yang terbatas pada rezim gangguan pantropis. Sebaliknya, terdapat banyak bukti bahwa angin dan petir yang terkait dengan badai petir merupakan pendorong utama kematian pohon dan dinamika biomassa hutan (Chambers dkk., 2013; Negron-Juárez dkk., 2018; Negron-Juárez dkk., 2017; Negron-Juárez dkk., 2023; Gora dkk., 2020b; Gora dan Esquivel-Muelbert, 2021). Di Amazon, kematian pohon akibat badai telah meningkat empat kali lipat sejak tahun 1980-an (Urquiza-Muñoz dkk., 2024), namun hanya sedikit penelitian di Amazon yang menyelidiki pemicu badai terhadap dinamika dan komposisi hutan. Variasi temporal dalam aktivitas badai memprediksi tingkat gangguan kanopi (Araujo dkk., 2021) dan variasi spasial dalam aktivitas badai merupakan korelasi yang kuat terhadap variasi spasial biomassa hutan, tingkat kematian biomassa, dan komposisi spesies (Gora dkk., 2020; Gorgens dkk., 2021; de Lima dkk., 2023; Feng dkk., 2023a). Sebagai contoh, aktivitas badai yang rendah dikaitkan dengan biomassa yang tinggi di Perisai Guyana, sedangkan frekuensi badai yang tinggi dikaitkan dengan biomassa yang lebih rendah dan tingkat gangguan yang lebih tinggi di seluruh bagian barat Amazon (Gorgens dkk., 2021). Badai kemungkinan besar memainkan peran yang sama di hutan tropis lainnya, tetapi analisis gangguan badai dari hutan tropis Afrika dan Indomalaya hampir tidak ada. Kesenjangan pengetahuan ini mengkhawatirkan karena semua data yang ada menunjukkan bahwa badai konvektif telah meningkat frekuensinya sebesar 5-25% per dekade dalam satu abad terakhir, dan diperkirakan akan terus meningkat (Taylor dkk., 2018; Raghavendra dkk., 2018; Lavigne dkk., 2019; Harel dan Price, 2020).

**Meningkatnya suhu:** Sebagian besar hutan tropis dataran rendah mengalami suhu rata-rata yang tinggi sepanjang tahun, dengan variabilitas musiman dan antartahunan yang relatif rendah, yang membuat hutan tropis secara unik rentan terhadap perubahan suhu (Cunningham dan Read, 2002). Proyeksi iklim menunjukkan bahwa hutan tropis akan semakin mengalami suhu rata-rata tahunan yang tidak sesuai dengan suhu rata-rata analog dan kejadian panas ekstrem sepanjang abad ke-21 (Seneviratne et al., 2021). Suhu tinggi dapat dengan cepat dan tidak linier meningkatkan defisit tekanan uap (VPD) (Barkhordarian et al., 2019), yang pada gilirannya berdampak negatif pada produktivitas primer akibat penutupan stomata (Lloyd dan Farquhar, 2008). Eksperimen telah menunjukkan bahwa spesies pohon tropis mampu mempertahankan produktivitas hingga 38°C jika VPD tidak meningkat (Smith et al., 2020). Namun, jika suhu rata-rata meningkat lebih dari 4°C di atas tingkat saat ini, ekosistem hutan tropis dapat mengalami periode suhu yang sering mendekati 50°C, yang dapat menyebabkan kerusakan jaringan yang tidak dapat dipulihkan dan hilangnya kapasitas fotosintesis secara terus-menerus (Doughty et al., 2023). Ambang batas yang tepat di mana suhu dan VDP akan menyebabkan kerusakan permanen dan ekstensif pada hutan tropis masih sangat tidak pasti (Slot dan Winter, 2016; Winter dan Roelfsema, 2024).

### 3 Kesenjangan Pengetahuan dan Pertanyaan

Terlepas dari pentingnya hutan tropis secara global, kita belum sepenuhnya memahami pola dan proses dasar yang mendukung keberlangsungan hidup hutan tropis, hal ini membatasi kemampuan kita untuk meramalkan peran hutan tropis di masa depan secara efektif dalam sistem bumi. Yang terpenting, sebagian besar kesenjangan pengetahuan saat ini bersifat transdisipliner, dan membutuhkan pemahaman yang lebih mendalam mengenai proses dan interaksi di antara ekosistem hutan tropis yang secara struktural, fungsional, dan sosial sangat beragam dan heterogen, dampak perubahan iklim, pergeseran rezim gangguan alami dan antropogenik, serta dampak gabungannya terhadap keanekaragaman hayati, siklus biogeofisik dan biogeokimia. Oleh karena itu, pertanyaan-pertanyaan sains PANGAEA mencakup lima tema sains yang dijelaskan di *Bagian 2*. Pertanyaan-pertanyaan yang membahas tema-tema ini - Siklus Biogeokimia, Keanekaragaman Hayati, Interaksi dan Umpan Balik Iklim, Sistem Sosial-Ekologi, dan Dinamika Gangguan - disusun berdasarkan pertimbangan pola (*Bagian 3.1*), proses (*Bagian 3.2*), dan proyeksi perubahan di masa depan (*Bagian 3.3*) untuk mencerminkan sifat transdisipliner. Pengukuran yang diperlukan untuk menyediakan data ekologi, sosial, dan geofisika untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan sains, akan diperoleh melalui metode darat, udara, dan satelit, dan dijelaskan secara singkat di bagian ini, dengan rincian lebih lanjut pada **Tabel 2** pada *Bagian 6.2* dan **Tabel -E1** pada *Lampiran E*. Jangkauan dan variasi pengumpulan data untuk pengukuran satelit, udara, dan darat ditunjukkan pada **Gambar 16**.



**Gambar 16.** Ilmu pengetahuan dan aplikasi PANGEA akan merekonsiliasi ketidaksesuaian skala melalui pengukuran in situ, menara, drone, pesawat terbang, dan satelit yang dikolaborasikan dengan kemajuan dalam pemodelan dan pemahaman tentang proses yang mendasari teori penskalaan.

## 3.1 Pola

### 3.1.1 Pola: Stok Karbon dan Fluks

Perkiraan stok dan fluks karbon saat ini sangat berbeda di seluruh wilayah tropis (Sullivan dkk., 2020; Xu dkk., 2021a; Muller-Landau dkk., 2021; Wang dkk., 2023a). Data dari Afrika, meskipun jarang dan dengan bias geografis serta kurangnya keterwakilan, menunjukkan bahwa rezim gangguan dan respons hutan terhadap gangguan berbeda dengan benua lain (Hubau et al., 2020; Bennett et al., 2021; 2023), meskipun hal ini masih terbuka untuk diperdebatkan. Selain itu, di seluruh wilayah tropis, pola spasial dan temporal dari dinamika gangguan tidak terkarakterisasi dengan baik, sehingga memperparah ketidakpastian mengenai masa depan anggaran karbon global (Pugh et al., 2020).

Untuk mengisi kesenjangan pengetahuan dalam data dan pemahaman kami tentang stok dan fluks karbon tropis, PANGEA akan menjawab pertanyaan terkait pola berikut untuk menjawab pertanyaan utama PANGEA di *Bagian 1*:

- **Q1.** Bagaimana hutan di seluruh wilayah tropis berbeda dalam hal cadangan karbon dan karbon dioksida, metana, serta fluks lateral, dan bagaimana **variasi spasial** di dalam setiap hutan berhubungan dengan iklim mikro, siklus hidrologi, tanah, geomorfologi, dan interaksi sosial-ekologi
- **Q2.** Bagaimana **variasi temporal** dalam fluks hutan tropis berhubungan dengan variasi temporal dalam cuaca dan bagaimana hal ini akan terpengaruh oleh perubahan iklim?
- **Q3.** Bagaimana **tipe gangguan** dan gradien dalam **rezim gangguan** memengaruhi cadangan dan fluks karbon, termasuk karbon dioksida, metana, dan fluks lateral?
- **Q4.** Bagaimana perbedaan geografis dan variasi spasial dan temporal **fenologi** pohon hutan tropis bervariasi dengan stok dan fluks karbon, dan apakah fenologi berubah dalam kaitannya dengan perubahan, termasuk perubahan iklim dan tata guna lahan, dan rezim gangguan?

Untuk meningkatkan **karakterisasi spasial** biomassa skala bentang alam (yaitu hutan, lahan pertanian, padang rumput), dan perbedaan biomassa di seluruh domain geografis inti dan yang diperluas, PANGEA akan mengintegrasikan data plot inventarisasi hutan dan pengukuran tambahan di lokasi-lokasi tertentu yang mencakup skala bentang alam, dengan data satelit dan data lidar dari udara. PANGEA akan bermitra dengan GEO-TREES, sebuah proyek yang mengkoordinasikan pengukuran di lapangan dari inventarisasi hutan dengan pemindaian laser terestrial, pesawat tanpa awak, dan pengumpulan data lidar dari udara. PANGEA akan memanfaatkan informasi mengenai estimasi stok karbon berbasis alometri pohon dan akan memprioritaskan kolokasi bentang alam dengan lokasi hutan GEO-TREES untuk mendukung upaya peningkatan (upscaling) dengan menggunakan **GEDI**, **NISAR**, **BIOMASS**, dan **EDGE\***. Untuk memajukan **kuantifikasi** fluks ekosistem secara **temporal**, PANGEA akan mengintegrasikan data CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> yang dikumpulkan dengan menggunakan pengukuran fluks kovarian eddy yang sudah ada (Baldocchi 2020) dan juga akan mengidentifikasi area untuk mengimplementasikan menara baru untuk mengisi kesenjangan data dan pengetahuan di seluruh iklim, keanekaragaman hayati, dan gradien gangguan. Pengukuran tambahan CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> akan dilakukan melalui penyebaran strategis ruang otomatis dan manual. Untuk menilai kendala regional dan pantropis pada fluks CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>, PANGEA akan menggunakan pengukuran jejak gas di udara, yang memainkan peran penting dalam kampanye lapangan NASA sebelumnya, seperti pengukuran profil vertikal Manaus selama LBA dan pengukuran jejak gas di udara CARVE dan Arktik-CAP selama ABoVE (Sweeney dkk., 2022). Data-data tersebut akan digunakan untuk memvalidasi pengamatan satelit dari sensor-sensor seperti **OCO-2 dan -3**, **TROPOMI**, **Carbon Mapper**, dan produk-produk baru dari satelit geostasioner, termasuk **GOES-R** (Crisp dkk., 2017; Lorente dkk., 2021; Khan dkk., 2021; Ranjbar dkk., 2023). **NISAR** dan **BIOMASS** akan digunakan untuk memetakan lahan basah tropis, yang akan diintegrasikan dengan data air permukaan dari Surface Water and Ocean Topography Mission (**SWOT**) untuk membatasi pengukuran fluks karbon secara lateral.

PANGEA akan berkolaborasi dengan Total Carbon Column Observing Network (TCCON) dan Collaborative Carbon Column Observing Network (COCCON) untuk mengisi kesenjangan validasi pengamatan satelit, terutama di Afrika, untuk menyelesaikan perdebatan mengenai estimasi sumber dan penyerap di daratan yang disimpulkan dari pengamatan OCO-2. TCCON dan COCCON adalah jaringan Spektrometer Fourier Transform berbasis di darat yang digunakan untuk mendapatkan kelimpahan rata-rata kolom CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HF, CO, H<sub>2</sub>O, dan HDO yang akurat dan tepat, yang

menjadi sumber validasi yang sangat penting bagi **OCO-2/3**, **GOSAT** dan **GOSAT-2**, **TROPOMI**, serta misi-misi lainnya. Pengukuran validasi ini saat ini sangat jarang dilakukan di daerah tropis, sehingga membatasi interpretasi pola fluks spatiotemporal yang disimpulkan dari data satelit CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>. Pengukuran ini juga akan membantu membatasi model dan mengukur ketidakpastian estimasi fluks CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> skala regional yang berasal dari pemodelan inversi (Beck dkk., 2013b; Liu dkk., 2016; Schuh dkk., 2019) untuk bentang alam di seluruh domain PANGAEA. Terakhir, PANGAEA akan mengukur dampak **gangguan kanopi** dari angin, petir, dan kekeringan, serta **fenologi hutan tropis** terhadap fluks dan stok karbon melalui kombinasi pengukuran lapangan, PhenoCams, dan drone serta data satelit untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan yang terkait dengan respons fenologi daun yang berbeda untuk setiap spesies dan tipe fungsional terhadap iklim dan gradien gangguan di seluruh bentang alam. Kumpulan data PANGAEA akan melengkapi upaya yang ada untuk memperluas cakupan geografis fenologi dengan menggunakan **data satelit Landsat**, **Sentinel-2**, dan **data satelit komersial** (Guan dkk., 2015; Yang dkk., 2021b; Wang dkk., 2023a).

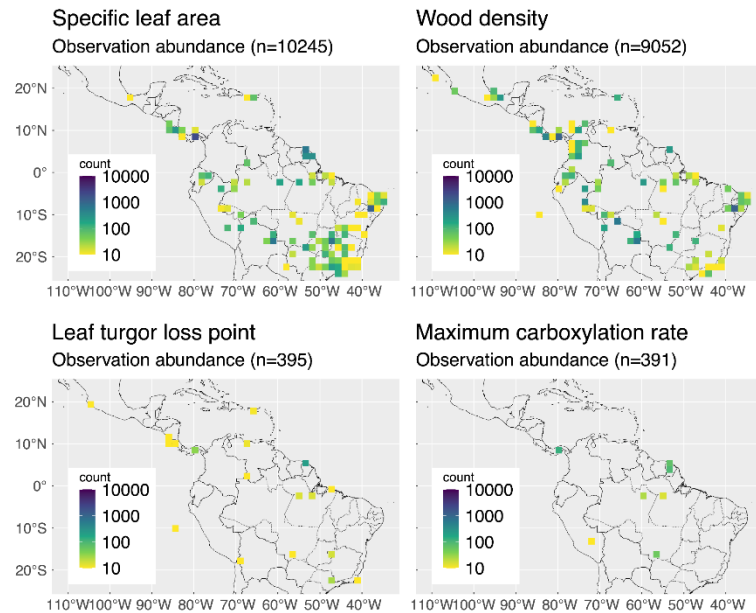
### 3.1.2 Pola: Keanekaragaman Hayati dan Komposisi Fungsional

Keanekaragaman hayati sangat bervariasi di antara benua tropis, tidak hanya karena perbedaan iklim, tetapi juga sebagai hasil evolusi di masa lalu (Corlett dan Primack 2006; Slik dkk., 2018; Raven dkk., 2020). Keanekaragaman hayati berhubungan positif dengan produktivitas primer bersih yang lebih tinggi di hutan tropis (Durán et al., 2019). Memahami mekanisme yang mendukung hubungan ini pada skala regional hingga pantropis merupakan kesenjangan pengetahuan yang dapat diisi oleh PANGAEA. Kita tidak memiliki informasi rinci mengenai keanekaragaman fungsional ekosistem hutan tropis. Kajian awal mengenai kelimpahan data sifat tanaman hutan tropis di daerah tropis Amerika, berdasarkan TRY (Kattge et al., 2020); LT-Brazil (Mariano et al., 2021) dan NGEE-Tropics (<https://ngt-data.lbl.gov/doi/>), menunjukkan bahwa beberapa lokasi di Panama Tengah dan pesisir Guyana Prancis merupakan tempat yang memiliki sebagian besar data sifat spesies pohon hutan, dan sebagian besar sifat tersebut memiliki informasi yang terbatas (**Gambar 17**), khususnya untuk spesies pohon di Afrika. Dengan mengatasi kesenjangan pengetahuan dan data ini, PANGAEA akan secara langsung menghubungkan pengukuran di lapangan dengan penginderaan jarak jauh dari udara dan satelit untuk memahami distribusi ciri-ciri fungsional tajuk dan keanekaragaman fungsional di seluruh bioma hutan tropis, serta menyelidiki kekuatan dan ketergantungan skala kontrol keanekaragaman hayati terhadap fungsi ekosistem. PANGAEA akan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut untuk mengisi kesenjangan pengetahuan dalam pemahaman keanekaragaman hayati dan komposisi fungsional di daerah tropis.

- **Q5.** *Bagaimana struktur dan fungsi hutan tropis berbeda secara geografis, dan bervariasi secara spasial dengan **keanekaragaman hayati** tanaman?*
- **Q6.** *Bagaimana **sebaran sifat fungsional** tanaman **di hutan tropis** di berbagai benua, dan bagaimana perbedaan ini mencerminkan respons terhadap gangguan dan gradien iklim?*
- **Q7.** *Sejauh mana cadangan karbon tropis dan dinamika siklus karbon terkait dengan **komposisi sifat fungsional** tanaman?*

Untuk menghubungkan metrik keanekaragaman hayati dengan keanekaragaman struktural dan fungsional, PANGEA akan mengumpulkan pengukuran di lapangan secara bersamaan dan pengamatan hiperspektral dari udara untuk mengetahui keanekaragaman hayati spesies dan komposisi sifat fungsional, serta gradien gangguan. PANGEA akan mengembangkan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bagaimana pendekatan ini memungkinkan estimasi komposisi fungsional dan keanekaragaman ekosistem hutan tropis (Feret dan Asner, 2013; Asner dkk., 2014b; Asner dkk., 2017; Chadwick dan Asner 2020; Ordway dkk., 2022). PANGEA akan menggunakan data hiperspektral dari udara dan satelit, termasuk dari misi **EMIT**; **PRISMA**; **DESI**; Plankton, Aerosol, Awan, Misi Ekosistem Samudra (**PACE**), dan **Planet Tanager**, dan akan memajukan kalibrasi dan pengembangan algoritme untuk mendukung ilmu pengetahuan dan aplikasi PANGEA dan misi **SBG**. PANGEA juga akan mengkarakterisasi keanekaragaman struktur hutan menggunakan lidar berbasis terestrial dan UAV, udara, dan ruang angkasa (**GEDI**, **EDGE\***) pada skala individu-pohon hingga ekosistem (misal, Decuyper et al, 2018; Dubayah dkk., 2020; Momo dkk., 2020, Terryn dkk., 2022; Schneider dkk., 2019; Ferraz dkk., 2016; Jucker dkk., 2018a; Schneider dkk., 2020; de Conto dkk., 2024). Untuk menyelidiki hubungan antara komposisi spesies tanaman dan fungsi ekosistem (Coverdale dan Davies 2023), PANGEA akan menggabungkan pengukuran keanekaragaman struktural dan fungsional dengan pengamatan penginderaan jarak jauh dan insitu terhadap CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, fluks air dan energi, serta siklus hara, dengan menggunakan rangkaian pengukuran dan pengambilan sampel ruang-waktu di seluruh bentang alam. Untuk menghubungkan keanekaragaman fungsional dengan respons ekosistem terhadap peristiwa ekstrem, pengumpulan data PANGEA akan mencakup bentang alam yang menunjukkan respons berbeda terhadap peristiwa ekstrem sebelumnya, misalnya El Nino 2015. Kami akan

menggunakan pendekatan ruang dan waktu jika tidak ada kejadian ekstrem selama PANGEA. Deteksi respons terhadap kejadian ekstrem, serta hubungan yang muncul antara keanekaragaman fungsional dan fungsi ekosistem akan digunakan untuk menskalakan dataset di seluruh domain PANGEA dan untuk perbandingan model berbasis proses. *Bagian 3.2.1* menyajikan pertanyaan-pertanyaan tambahan terkait keanekaragaman hayati PANGEA yang tidak hanya mencakup botani, tetapi juga mencakup taksa non-tumbuhan dan interaksi spesies. Berdasarkan percakapan dengan para kolaborator Masyarakat Adat selama upaya pelingkupan PANGEA, menjawab pertanyaan-pertanyaan dalam *Bagian 3.2.1* akan lebih bermanfaat jika dilakukan dengan mengintegrasikan Pengetahuan



**Gambar 17.** Jumlah pengamatan untuk sifat-sifat tertentu di seluruh daerah tropis Amerika, berdasarkan basis data yang ada-TRY (Kattge et al. 2020); LT-Brasil (Mariano et al. 2021, dan referensi di dalamnya); dan NGEE-Tropis (<https://ngt-data.lbl.gov/doi/>). Untuk luas daun spesifik dan laju karboksilasi maksimum, penghitungan hanya mencakup pengamatan yang secara tegas diambil dari kanopi atau daun yang terpapar sinar matahari.

Ekologi Masyarakat Adat, Tradisional, dan Lokal (IEK, TEK, dan LEK) dengan bentuk-bentuk pengetahuan dan data lainnya. Kami percaya bahwa IEK, TEK, dan LEK memiliki potensi untuk memajukan pemahaman tentang semua pertanyaan sains PANGEA dengan cara-cara yang akan dieksplorasi melalui ilmu pengetahuan yang dikembangkan bersama dan adil.

### 3.1.3 Pola: Interaksi dan Ambang Batas Tanah-Atmosfer

Meskipun terdapat kemajuan dalam memahami interaksi dan umpan balik antara biosfer dan atmosfer di wilayah tropis dari proyek dan kampanye NASA sebelumnya (Davidson dkk., 2012), masih terdapat kesenjangan pengetahuan yang substansial mengenai bagaimana interaksi ini bervariasi di dalam dan di seluruh benua (Phillipon dkk., 2019; Pohl dkk., 2021; Martins dkk., 2018; Chakraborty dkk., 2019; Jonard dkk., 2022). Kondisi hidroklimatik di hutan tropis sangat bervariasi di sepanjang gradien gangguan, mulai dari hutan yang masih utuh hingga bentang alam yang sangat terfragmentasi (Gutierrez-Cori dkk., 2021), dan terdapat bukti dari pemodelan dan studi penginderaan jauh bahwa degradasi hutan tropis yang meluas dapat mengubah fluks energi dan air (mis. Longo dkk., 2020; Rangel Pinagé dkk., 2023), tetapi dampak degradasi hutan terhadap intensitas curah hujan dan daur ulang air masih belum diketahui. Dampak deforestasi terhadap jalur transportasi untuk daur ulang kelembapan atmosfer menjadi fokus penelitian yang semakin meningkat di Amazon, namun pada tingkat yang lebih rendah di Afrika Tengah (van der Ent dkk., 2010; Zemp dkk., 2017; Baker dan Spracklen 2022; Te Wierik dkk., 2022; Xu dkk., 2022; Staal dkk., 2023; Theeuwes dkk., 2023; Flores dkk., 2024; Nyasulu dkk., 2024). Kesenjangan pengetahuan di Afrika ini menjadi perhatian mengingat bukti terbaru yang menunjukkan bahwa hutan tropis Afrika Tengah lebih bergantung pada daur ulang kelembapan untuk menyediakan kelembapan atmosfer bagi curah hujan dibandingkan dengan Amazon (Worden dkk., 2021b, 2024; Baker dan Spracklen, 2022). Selain itu, aktivitas kebakaran terkait penggunaan lahan dapat secara signifikan mengubah konsentrasi aerosol di atmosfer dan secara langsung memengaruhi aktivitas konvektif di ekosistem tropis (Andreae et al., 2004; Freire et al., 2020). Untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan terkait interaksi lahan-atmosfer dan ambang batas hidroklimat, PANGEA akan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- **Q8.** Bagaimana *interaksi tanah-atmosfer*, termasuk daur ulang kelembapan dan fluks karbon, bervariasi dengan umpan balik iklim, gangguan, kapasitas penyimpanan karbon, dan ketahanan hutan tropis, di bawah kondisi lingkungan yang berubah?
- **Q9.** Bagaimana *ambang batas hidroklimatik*, seperti tingkat kelembapan tanah yang kritis atau batas termal, bervariasi di dalam dan di antara benua tropis?

Untuk menyelidiki bagaimana interaksi darat-atmosfer bervariasi di seluruh benua, PANGEA akan mengembangkan pengukuran yang digunakan untuk variasi spasial dan temporal cadangan karbon (*Bagian 3.1.1*), dan keragaman struktural dan fungsional (*Bagian 3.1.2*), yang dilengkapi dengan pengukuran di lapangan dari stasiun mikrometeorologi, fluks panas laten dan panas yang dapat dirasakan dari menara kovarians eddy, kelembapan tanah, pengukuran ekofisiologi kanopi, dan kelembapan bahan bakar hidup dan mati. PANGEA akan menskalakan data tanah dan menara pada kelembapan tanah, kandungan air kanopi, sifat hidrolik, dan tekanan termal serta evapotranspirasi (ET) ke daerah pantropis dengan menggabungkan radar udara dan hiperspektral dengan **SMAP**, Misi Kelembapan Tanah dan Salinitas Laut (**SMOS**), **NISAR** \*, Advanced Microwave Scanning Radiometer untuk Misi EOS (**AMSR-E**), **EMIT**, **ECOSTRESS**, dan Misi Penjelajah Fluoresensi (**FLEX**). Data berbasis lapangan dari PANGEA akan semakin meningkatkan estimasi kelembapan tanah **SMAP** di hutan tropis, yang diketahui memiliki bias yang signifikan di ekosistem tropis (Cho et al., 2024), dengan

mengembangkan upaya koreksi yang telah dilakukan baru-baru ini (Wang et al., 2024). Untuk mengidentifikasi ambang batas hidroklimat kritis, PANGEA akan memajukan pendekatan baru untuk mengukur tekanan air vegetasi dari luar angkasa. Sebagai contoh, kandungan air kanopi dari data hiperspektral udara telah mengilustrasikan pola yang bermakna secara ekologis terkait dengan tekanan air di sistem Mediterania (Brodrick et al., 2019; Paz-Kagan dan Asner 2017), dan PANGEA akan menguji kemampuan transferabilitas pendekatan ini ke daerah tropis. Estimasi kedalaman optik vegetasi dari penginderaan jauh gelombang mikro merupakan teknologi lain yang menjanjikan untuk kuantifikasi cekaman terkait kekeringan (Konings et al., 2021), dan PANGEA akan menginvestigasi bagaimana mengukur respons tingkat daun dan individu, serta menilai ketidakpastian dan memperhitungkan efek perancu, seperti sinyal yang didominasi oleh air permukaan daun dan bukannya air interstisial (Xu et al., 2021b). PANGEA akan mengumpulkan pengukuran ekofisiologi tingkat daun kanopi dan menggunakan metode pengambilan data kedalaman optik vegetasi (VOD) berbasis menara dengan menggunakan sinyal gelombang mikro GNSS (Humphrey dan Frankenberg, 2023). PANGEA juga akan mengevaluasi skalabilitas pengukuran ini dengan menggunakan pengambilan data hiperspektral dan gelombang mikro dari udara dan luar angkasa. Data fluoresensi matahari yang diinduksi (SIF) dan data termal berbasis menara dan udara juga akan digunakan untuk mengevaluasi pengukuran GPP dan ET diurnal dan musiman untuk membatasi produk data dan metrik yang diambil dari satelit seperti **ECOSTRESS** (mis., Fisher dkk., 2020; Li dkk., 2021) dan pengambilan SIF dari satelit seperti **OCO-2/3** dan **TROPOMI** (Sun dkk., 2018). Produk yang dibatasi akan memberikan data kalibrasi yang berharga untuk kelembaban tanah yang diindera dari jarak jauh, ekofisiologi tanaman, GPP, dan ET pada skala regional untuk model berbasis proses.

## 3.2 Proses

### 3.2.1 Proses: Interaksi dan Ketahanan Spesies

Meskipun hutan tropis dikenal sebagai ekosistem dengan keanekaragaman hayati yang tinggi, ilmu pengetahuan dan teknologi untuk mengukur dan memantau keanekaragaman hayati dalam skala besar, serta pemahaman proses bagaimana keanekaragaman struktural dan fungsional menjadi perantara dalam siklus karbon, air, energi, dan hara, masih dalam tahap awal. Selain itu, sebagian besar model biosfer terestrial masih merepresentasikan hutan tropis dengan tipe fungsional tanaman yang lebih sedikit dibandingkan dengan hutan beriklim sedang (misalnya, Lawrence dkk., 2019; Schaphoff dkk., 2018). Bahkan ketika model mewakili berbagai strategi sejarah kehidupan, mendapatkan koeksistensi yang kuat dalam simulasi tetap menjadi tantangan yang signifikan (Koven dkk., 2020; Li dkk., 2023; Powell dkk., 2018). Sebagian dari tantangan ini berasal dari fakta bahwa tanaman di hutan tropis yang lebat harus bersaing untuk mendapatkan berbagai sumber daya yang terbatas (cahaya, air, nutrisi) dan terdapat tarik-ulur yang kuat antara akuisisi sumber daya, pertumbuhan, dan kelangsungan hidup (Choat dkk., 2018; Oliveira dkk., 2021a). Pertukaran ini dicirikan oleh sifat fungsional yang berbeda, tetapi sebagian besar upaya untuk mengkarakterisasi distribusi sifat pada skala regional dan global menghasilkan ketidaksepakatan yang nyata dalam estimasi untuk hutan tropis (Dechant et al., 2024). Selain itu, komunitas tumbuhan di berbagai benua memiliki sejarah evolusi yang berbeda (Slik et al., 2018), serta interaksi tumbuhan-hewan kontemporer yang unik di setiap benua tropis (Corlett & Primack, 2006). Sebagai contoh, di Afrika Tengah, megafauna herba seperti gajah hutan yang secara selektif mengonsumsi spesies dengan kerapatan kayu yang lebih rendah dan membantu penyebaran spesies tanaman berbiji besar yang memiliki kerapatan kayu rata-rata yang tinggi dapat secara langsung dan tidak langsung mendukung hutan

yang lebih padat karbon dan membantu kapasitas penyerapan karbon (Berzaghi et al., 2019). Penelitian menunjukkan bahwa hilangnya megaherbivora hutan tropis dapat mengurangi cadangan karbon hutan tropis sebanyak 9% (Berzaghi et al., 2018, 2023). Hilangnya megaherbivora ini mungkin telah mengubah hubungan antara keanekaragaman hayati dan fungsi hutan, tetapi hipotesis ini masih perlu diuji. Hutan tropis juga mengalami perubahan signifikan melalui deforestasi dan degradasi hutan. Penelitian sebelumnya telah mengindikasikan bahwa tingkat degradasi yang rendah sekalipun dapat mengurangi keanekaragaman hayati di hutan tropis secara signifikan (Barlow et al., 2016). Memahami bagaimana kehilangan tersebut berdampak pada kemampuan hutan untuk pulih dan merespons perubahan iklim yang semakin meningkat merupakan prioritas penelitian yang sangat penting. Meskipun semakin banyak bukti yang menunjukkan peran satwa liar dalam siklus biogeokimia, khususnya fluks dan penyerapan karbon (Berzaghi dkk., 2018, 2023; Schmitz dkk., 2018), sejauh mana satwa liar memengaruhi siklus karbon alami masih menjadi area penelitian aktif dan belum terwakili dengan baik dalam ESM yang ada. Oleh karena itu, PANGEA akan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- **Q10.** Apa peran *keanekaragaman hayati* dalam mendorong variasi stok dan fluks karbon hutan tropis pada skala lokal, regional, dan benua?
- **Q11.** Bagaimana *interaksi tanaman-hewan* memediasi kerentanan atau ketahanan stok dan fluks karbon hutan tropis?
- **Q12.** Seberapa rentan atau tangguhkah *interaksi spesies* yang menopang fungsi hutan tropis, termasuk interaksi antar kebiasaan hidup (pohon, liana, palem, herba/rumput, dan bambu) terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan?
- **Q13.** Apa saja *ciri-ciri fungsional dan atribut struktural tanaman* yang memberikan ketahanan terhadap siklus karbon, dan bagaimana hal tersebut bervariasi di berbagai tipe hutan, gradien lingkungan, dan secara vertikal di dalam hutan?

Selain pengukuran yang dijelaskan di *Bagian 3.1.2*, karakterisasi keanekaragaman hayati di berbagai skala akan menggabungkan pengukuran in-situ yang mencakup keanekaragaman taksonomi tanaman dan kelimpahannya serta data pergerakan hewan, yang dikumpulkan dengan menggunakan sensor bioakustik, perangkat kamera, DNA lingkungan, Pengetahuan Ekologi Lokal (Indigenous Ecological Knowledge, IEK), Pengetahuan Ekologi Tradisional (TEK), Pengetahuan Ekologi Lokal (LEK), lidar dan radar hiperspektral dari udara, serta lidar dan radar hiperspektral satelit (**EMIT, PRISMA, DESIS, PACE, dan Planet Tanager**). Kumpulan data ini (lihat *Bagian 6*) akan memungkinkan estimasi keanekaragaman hayati secara langsung dan tidak langsung dan akan memberikan kondisi awal dan tolok ukur untuk model biosfer terestrial berbasis proses yang dapat merepresentasikan keanekaragaman struktural dan fungsional (contohnya, BiomeE, ED/ED2, FATES; *Bagian 6.3*). Model-model ini kemudian akan digunakan untuk mengembangkan pemahaman proses dan atribusi peran keanekaragaman hayati terhadap fluks karbon, air, dan energi, serta bagaimana hubungan ini bervariasi di dalam dan di seluruh benua. Untuk menyelidiki bagaimana keanekaragaman hayati dan perubahan keanekaragaman hayati yang disebabkan oleh penggunaan lahan berdampak pada ketahanan hutan tropis terhadap iklim ekstrem, PANGEA akan mengidentifikasi bentang alam di seluruh gradien gangguan, iklim, dan edafik, dan mengukur hubungan yang muncul antara komposisi struktural/fungsional hutan dan sensitivitas hutan terhadap iklim ekstrem. Indikator tekanan air dan fungsi ekosistem (*Bagian 3.1.3*), sebagai contoh, akan dikembangkan dengan menggunakan data dari **SMAP, SMOS, NISAR\*, AMSR-E, EMIT, ECOSTRESS, FLEX, TROPOMI, dan OCO-2/3**. Hubungan-hubungan ini akan diterapkan untuk membatasi model inversi dan model biosfer terestrial berbasis

proses, sehingga memungkinkan model-model ini untuk mengaitkan peran keanekaragaman hayati dalam memitigasi dampak perubahan global terhadap penyerap karbon di daratan tropis.

### 3.2.2 Proses: Umpan Balik Fungsi Gangguan-Ekosistem

Perubahan rezim gangguan, termasuk kekeringan, kebakaran, badai, dan perubahan tata guna lahan, membentuk kembali hutan tropis. Wilayah tropis di berbagai benua memiliki respons yang berbeda terhadap peristiwa gangguan serupa, seperti peristiwa El Nino (Liu et al., 2017). Perbedaan antar benua ini dapat dikaitkan dengan perbedaan ketahanan hutan terhadap tindakan manusia dan perubahan iklim (Bennett et al., 2021; Saatchi et al., 2021), namun mekanisme yang mendasari perbedaan kerentanan hutan masih sulit dipahami. Demikian pula, kami tidak memiliki kuantifikasi pendorong kematian pohon dalam skala besar, dan alasan kematian pohon yang lebih tinggi di berbagai benua (McDowell dkk., 2018; Gora dan Esquivel-Muelbert, 2021). Sebagian dari kesulitan ini berasal dari keterbatasan penskalaan. Meskipun badai, siklon, dan topan menghasilkan gangguan badai skala besar di hutan tropis pesisir, hal ini tidak umum terjadi di lokasi inti PANGEA di Amerika dan Afrika (Walsh dkk. 2016). Sebagian besar gangguan terkait badai terjadi pada skala yang sangat kecil (<0,1 ha) (Espírito-Santo dkk., 2014; Negron-Juárez dkk., 2018; Negron-Juárez dkk., 2023). Gangguan skala kecil tersebut terlalu kecil untuk dideteksi dengan metode satelit kontemporer (Cushman et al., 2021). Angin puting beliung yang besar di hutan Amazon dapat mencapai ratusan hingga ribuan hektar dan semakin sering terjadi (Feng dkk., 2023b; Urquiza-Muñoz dkk., 2024). Namun, dibandingkan dengan kejadian angin puting beliung kecil, angin puting beliung besar jarang terjadi. Banyak gangguan angin ribut kecil tidak dapat diatribusikan dengan andal menggunakan metode plot hutan tradisional karena interval yang biasanya panjang antara sensus pohon (Arellano et al., 2021). Data yang menjelaskan mekanisme yang mendasari kerentanan pohon terhadap angin dan petir terkait badai juga terbatas (Gora dkk., 2017; 2020b; Jackson dkk., 2019; 2021a, 2021b; Feng dkk., 2023a). Secara lebih luas, pengaruh relatif kelaparan karbon dan kegagalan hidrologis terhadap kematian pohon di daerah tropis, serta pendorong dan mekanisme pengaruh tersebut masih menjadi kesenjangan pengetahuan yang besar (Anderegg dkk., 2016; McDowell dkk., 2018; Bauman dkk., 2022). Memahami efisiensi penggunaan karbon dan air yang bervariasi dari waktu ke waktu dari ekosistem hutan tropis dalam kaitannya dengan tren kematian pohon dan serapan dan respirasi karbon skala ekosistem, terutama sebagai respons terhadap kejadian ekstrem, sangat penting untuk merekonsiliasi dinamika sumber-tenggamel hutan tropis (Chambers dkk., 2004; Peñuelas dkk., 2010; Adams dkk., 2019). Untuk memajukan pemahaman mengenai respons ekosistem yang berbeda terhadap peristiwa kematian dan gangguan, diperlukan data terpadu mengenai kematian pohon, efisiensi penggunaan karbon dan air, serta tingkat pemulihan pasca-gangguan yang mencakup rezim gangguan, pola komposisi fungsional, dan tata guna lahan. PANGEA akan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- **Q14.** Bagaimana perubahan rezim gangguan mempengaruhi *efisiensi penggunaan karbon (CUE)* dan *efisiensi penggunaan air (WUE)* hutan tropis yang berbeda?
- **Q15.** Bagaimana tingkat dan pola *kematian pohon* bervariasi di dalam dan di seluruh hutan tropis sebagai respons terhadap pergeseran proses pemaksaan, termasuk iklim, perubahan tata guna lahan, dan rezim gangguan? Bagaimana variabilitas temporal dan spasial dari kematian mempengaruhi heterogenitas cadangan dan fluks karbon tropis di seluruh hutan tropis?

Untuk mengkarakterisasi distribusi spasial dan temporal pergantian kanopi dan gangguan degradasi di seluruh wilayah tropis, PANGEA akan memanfaatkan upaya-upaya yang telah dilakukan untuk mengukur degradasi hutan berskala kecil dari ruang angkasa menggunakan pembelajaran mendalam (misalnya, Dalagnol dkk., 2023). Dengan pendekatan ini, PANGEA akan menyelidiki integrasi berbagai sumber penginderaan jauh satelit-data RGB dan lidar pesawat dan pesawat, data optik resolusi tinggi komersial, **Landsat**, **Sentinel-1**, **Sentinel-2**, **GEDI**, **NISAR\***, **BIOMASS\***, dan **EDGE\*-untuk** memajukan pemantauan mortalitas pohon dan rezim gangguan alami dari luar angkasa, dengan cara yang sebelumnya telah dicoba dengan data lidar dari udara (Dalagnol dkk., 2021). Model pembelajaran mendalam akan dilatih dengan menggabungkan pengukuran mortalitas dan gangguan di lapangan pada bentang alam utama PANGEA (*Bagian 6.3*) dengan data mortalitas plot inventarisasi lapangan. Untuk menyelidiki hubungan yang muncul antara rezim gangguan, CUE dan WUE di berbagai bentang alam, PANGEA akan menggabungkan mortalitas dan degradasi hutan dengan estimasi resolusi tinggi WUE dan CUE yang berasal dari data hiperspektral, multispektral, dan VOD dari udara dan antariksa, termasuk **Landsat**, **ECOSTRESS**, **EMIT**, dan **AMSR-E**, dan menguji kekuatan hubungan ini di lokasi dengan fluks kovariansi eddy dan inventarisasi petak-petak hutan. Data dari udara, terutama hiperspektral, akan sangat penting untuk mengevaluasi skalabilitas metrik-metrik ini dari pohon-pohon dengan efisiensi penggunaan karbon dan air yang berbeda dan beragam untuk seluruh ekosistem. Peta degradasi hutan yang bergantung pada ruang dan waktu akan digunakan untuk mendorong tingkat gangguan dalam model berbasis proses. Peta mortalitas dan hubungan yang muncul antara tingkat mortalitas dan WUE dan CUE akan digunakan untuk perbandingan model di sepanjang gradien pengaruh lingkungan dan antropogenik serta di seluruh benua.

### 3.2.3 Proses: Dinamika dan Manajemen Pemulihan

Seiring dengan perubahan iklim yang meningkatkan laju perulangan gangguan alam, perluasan deforestasi dan degradasi hutan semakin memperkuat rezim gangguan iklim di seluruh hutan tropis (Armenteras dkk., 2006; Portela & Rademacher, 2001; Jusys 2018; Hosonuma dkk., 2012). Gangguan yang lebih sering terjadi menjadi ancaman bagi ketahanan hutan tropis, yang berpotensi memengaruhi transisi kritis ke kondisi alternatif (Verbesselt dkk., 2016; Whitfield dkk., 2019; Falk dkk., 2022). Namun, untuk menilai risiko tersebut, sangat penting untuk mengukur secara menyeluruh seberapa sering gangguan terjadi, ketahanan ekosistem terhadap gangguan, dan waktu pemulihan setelah dampak gangguan (Cole dkk., 2014; Longo dkk., 2018). Meskipun banyak penelitian yang berfokus pada dampak gangguan (misalnya, McDowell dkk., 2018; Brando dkk., 2014), masih terdapat ketidakpastian yang besar pada tingkat pemulihan. Pemulihan hutan sekunder dan hutan terdegradasi tropis saat ini mencakup sekitar 10% dari luas hutan tropis dan memiliki potensi penyerap karbon yang besar (Heinrich et al., 2023). Penelitian berbasis lapangan sebelumnya mengindikasikan bahwa lintasan restorasi pascagangguan dan tingkat pemulihan, serta skala waktu, sangat bervariasi di seluruh wilayah tropis dan bergantung pada intensitas gangguan dan jenis gangguan (Poorter dkk., 2016; Rutishauser dkk., 2015). Selain badai, dampak konektivitas geografis dari perubahan pengelolaan lahan di berbagai skala juga sangat penting. Sebagai contoh, pergeseran dari sistem pertanian intensif ke sistem wanatani dan manajemen restorasi (misalnya, pengelolaan oleh masyarakat adat), serta intervensi yang ditujukan untuk konservasi, dapat menghasilkan keanekaragaman hayati dan restorasi biomassa lokal serta meningkatkan ketahanan sistem yang akan mendukung mata pencaharian masyarakat setempat (misalnya, Ebeling & Yasué, 2008; Santika dkk., 2017; Mills dkk., 2019; Pienkowski dkk., 2024). Wilayah tropis memainkan peran yang semakin besar dalam pertanian global (Alexandratos dan Bruinsma, 2012; Berenguer dkk., 2021a) dan terdapat tekanan yang sangat besar terhadap hutan tropis akibat ekspansi pertanian karena meningkatnya permintaan global akan pangan, serat, dan bahan bakar nabati (Erb dkk., 2024; Pendrill dkk., 2022). Intensifikasi pertanian untuk mendukung permintaan global dan mata pencaharian lokal akan sangat diuntungkan oleh metode pertanian presisi dan pemantauan siklus biogeokimia (misalnya, fosfor dan nitrogen) untuk memastikan solusi yang berkelanjutan. Di sisi lain, intensifikasi pertanian dan upaya untuk meningkatkan keberlanjutan juga dapat menyebabkan kebocoran dan perpindahan gangguan ke wilayah lain (Ewers dan Rodrigues, 2008; Gan dan McCarl, 2007; Henders dan Ostwald, 2014, Meyfroidt et al., 2020; Hertel et al., 2019). Untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan terkait pemulihan pascagangguan dan ketahanan hutan tropis yang terkait dengan praktik pengelolaan lahan, PANGEA akan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- **Q16.** *Bagaimana jenis dan intensitas gangguan-termasuk penggunaan lahan yang berbeda-mempengaruhi **waktu pemulihan pascagangguan dan lintasan** menuju pemulihan struktur hutan, komposisi spesies, dan fungsi ekosistem?*
- **Q17.** *Kegiatan manusia dan praktik pengelolaan apa saja yang mendukung ketahanan penyerap karbon tropis, termasuk penggunaan kawasan lindung dan tindakan konservasi berbasis kawasan (OECM) lainnya seperti praktik masyarakat adat dan teritorial, sistem wanatani, dan praktik penebangan selektif?*

Untuk mengukur skala waktu pemulihan pasca-gangguan, PANGEA akan mengintegrasikan data dari inventarisasi lapangan di wilayah yang terkena dampak gangguan dengan informasi usia gangguan yang diperoleh dari penginderaan jauh jangka panjang (mis, menggunakan **Landsat**) dan penginderaan jarak jauh yang lebih baru mengenai struktur hutan dari lidar (lidar udara, **GEDI**, **EDGE\***,

**NISAR\***, dan **BIOMASS\***), komposisi hutan dari citra hiperspektral (hiperspektral udara, **EMIT**, **PRISMA**, **DESIS**, **PACE**, dan **Planet Tanager**), fungsi ekosistem (**ECOSTRESS**, **TROPOMI**), dan sistem pertanian (**Landsat**, **EMIT**, **NISAR\***, **Planet**) untuk membuat kronosejarah lanskap pada berbagai tingkatan lingkungan dan pengelolaan. Kronosequences ini akan digunakan untuk mengurangi ketidakpastian dalam model berbasis proses yang kemudian akan digunakan untuk mengaitkan peran pendorong lingkungan dan karakteristik gangguan yang berbeda pada skala waktu pemulihan di seluruh domain PANGEA. Dengan memasukkan batasan-batasan pemulihan ke dalam model, maka model ini dapat mensimulasikan pemulihan hutan dan interaksi yang kompleks di antara komposisi spesies, struktur hutan, dan faktor lingkungan dengan lebih baik. Hal ini akan meningkatkan kemampuan model ekosistem untuk memproyeksikan pergeseran stok karbon di masa depan di bawah rezim gangguan yang berubah dan menginformasikan upaya konservasi dan restorasi (Hérault dan Piloniot, 2018; de Paula dkk., 2015; Shi dkk., 2024; Zhang dkk., 2022).

Dengan mengacu pada berbagai kerangka kerja SES, PANGEA akan mengadopsi perspektif sistem yang memusatkan umpan balik antara sistem manusia (termasuk tata kelola, kebijakan, pasar, norma budaya, dan nilai-nilai) dan proses lingkungan, untuk lebih memahami bagaimana aktivitas manusia dan praktik pengelolaan mempengaruhi ketahanan lanskap tropis. PANGEA akan memanfaatkan upaya yang sedang berlangsung dari berbagai kegiatan (misalnya, **NASA Harvest**, **SERVIR**) untuk mendeteksi aktivitas manusia dan agroekosistem, yang memungkinkan pemetaan dan pemantauan sumber daya alam (Meemken dkk., 2024), dan kemajuan dalam pemetaan jenis tanaman, hasil panen, dan risiko bencana (Jain dkk., 2016; Azzari dkk., 2017; Meza dkk., 2020; Song dkk., 2021) yang diperlukan untuk memungkinkan mata pencaharian dan meningkatkan kesejahteraan manusia. Untuk mengatasi keragaman praktik pengelolaan di berbagai pelaku dalam sistem tropis, PANGEA akan mengembangkan kategorisasi rezim pengelolaan global yang sudah ada (Lesiv et al., 2022) bersama dengan informasi lokal yang spesifik mengenai keragaman opsi implementasi untuk rezim yang berbeda ini. PANGEA juga akan mengeksplorasi pendekatan terbaru untuk mengekstraksi informasi sosial-ekonomi dari data satelit (Yeh et al., 2020). Dengan menggunakan metode yang mengintegrasikan data penginderaan jauh dengan data in situ dan informasi serta pengetahuan tambahan lainnya, PANGEA akan memajukan pengukuran sistem sosial-ekologi tropis dan menyelidiki hubungan sebab-akibat untuk menguji apakah umpan balik SES mendukung ketahanan penyerap karbon tropis dan proses ekosistem lainnya.

### 3.2.4 Proses Umpan Balik Siklus Hidrologi

Hutan tropis memainkan peran penting dalam siklus air (van der Ent dkk., 2010; Spracklen dkk., 2018), dan proyeksi iklim dari CMIP6 mengindikasikan adanya peningkatan kekeringan ekstrem dan kebasahan ekstrem di berbagai wilayah tropis (Vogel dkk., 2020). Deforestasi hutan tropis memiliki dampak yang nyata terhadap curah hujan yang bergantung pada skala deforestasi (Spracklen et al., 2018). Pergeseran fluks air dan energi yang disebabkan oleh degradasi yang meluas juga dapat berdampak pada daur ulang curah hujan di wilayah tropis, tetapi hipotesis ini belum diuji. Degradasi hutan memiliki dampak yang nyata terhadap evapotranspirasi dan fluks panas yang masuk akal (Brando dkk., 2019b; Jucker dkk., 2018b; Longo dkk., 2020; de Oliveira dkk., 2021; Rangel Pinagé dkk., 2023). Studi sebelumnya telah menemukan kesesuaian yang menggembirakan dalam hal besaran dan variabilitas musiman evapotranspirasi antara estimasi penginderaan jauh dan menara kovarians eddy di hutan tropis (Melo dkk., 2021; Salazar-Martínez dkk., 2022), tetapi studi tersebut bergantung pada jumlah lokasi yang sangat terbatas. Pada kenyataannya, terdapat variasi spasial yang cukup besar dalam hal besaran dan musiman ET pada skala regional dan benua (misalnya, Baker dkk.,

2021; Weerasinghe dkk., 2020). Efek gabungan dari pergeseran pola curah hujan, suhu yang lebih hangat, serta perluasan deforestasi dan degradasi hutan berdampak pada debit sungai, habitat air tawar, dan kualitas air (Lima dkk., 2014; Castello dan Macedo, 2016); akan tetapi, perkiraan besaran dampak ini masih belum dapat dipastikan (Guimberteau dkk., 2017; Farinosi dkk., 2019). Memahami dampak bersih dari siklus hidrologi terhadap sumber daya air tawar juga penting secara ekonomi, karena banyak negara di daerah tropis bergantung pada pembangkit listrik tenaga air (Arias et al., 2020). Studi tentang sumber daya air tawar tropis terkonsentrasi di Amerika Selatan yang beriklim tropis dan jarang dilakukan di Afrika dan lembah sungai Kongo (Fugère et al., 2016). Selain itu, model Sistem Bumi memiliki kemampuan terbatas untuk memetakan distribusi spasial curah hujan di daerah tropis karena model tersebut tidak dapat merepresentasikan kejadian curah hujan ekstrem (Negron-Juarez dkk., 2024), dan terdapat perbedaan yang mencolok dalam cara model merepresentasikan daur ulang curah hujan di berbagai benua (Baker dan Spracklen, 2022). Model-model tersebut juga membutuhkan representasi ET dan fluks panas sensibel yang akurat untuk mengukur daur ulang curah hujan, serta produk penginderaan jauh untuk membandingkan ET pada skala regional. Untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan tersebut, PANGEA akan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- **Q18.** Apa saja ***kontrol hidroklimat*** langsung dan tidak langsung terhadap karbon hutan tropis (termasuk emisi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$ ), siklus energi dan air?
- **Q19.** Bagaimana ***daur ulang curah hujan*** mempengaruhi ketahanan atau ***kerentanan keseimbangan karbon hutan*** dengan ***pergeseran rezim gangguan***, tutupan lahan dan perubahan tata guna lahan, dan peningkatan  $\text{CO}_2$  atmosfer?
- **Q20.** Bagaimana perubahan iklim dan tata guna lahan mengubah ***sifat biofisik permukaan lahan*** yang mempengaruhi kekuatan interaksi darat-atmosfer?
- **Q21.** Bagaimana ***deforestasi, degradasi*** hutan, dan ***pertumbuhan kembali hutan*** mengubah ***siklus hidrologi*** regional di wilayah tropis, termasuk rezim curah hujan dan sumber daya air tawar?

Untuk menyelidiki faktor pendorong hidroklimat fungsi ekosistem di seluruh wilayah tropis, PANGEA akan mengintegrasikan pengukuran cuaca in-situ dan kovarian eddy dengan pengambilan data kandungan uap air dan curah hujan melalui satelit (**GOES-R**, **GPM**), temperatur permukaan tanah, evapotranspirasi dan tekanan penguapan (**ECOSTRESS**) serta SIF (**FLEX\***, **TROPOMI**, **OCO- 2/3**). Selain itu, PANGEA akan menggunakan data **SMAP**, **SMOS**, **NISAR**, **AMSR-E**, dan **EMIT** untuk mengukur kelembaban tanah, kandungan air tajuk, sifat hidrologi, dan tekanan panas. Untuk mengukur lebih lanjut sifat biofisik permukaan tanah, PANGEA juga akan memperoleh albedo permukaan, dan fluks radiasi permukaan lainnya dari **VIIRS** dan **GOES-R**. Pengukuran hidrologi permukaan dari **SWOT** akan digunakan untuk mengkarakterisasi badan air terestrial tropis (danau, waduk, lahan basah) dan menilai sumber daya air tawar. Dataset ini akan digunakan bersama dengan perubahan struktur, fungsi, dan komposisi spesies hutan yang terkait dengan deforestasi dan degradasi hutan (*Bagian 3.2.3*) untuk menilai hubungan yang muncul antara berbagai jenis tutupan lahan dan perubahan tata guna lahan dengan perubahan curah hujan dan penyimpanan air di seluruh domain PANGEA. Dataset ini juga akan memberikan kondisi awal dan batas untuk model berbasis proses (*Bagian 6.3*) yang mengeksplorasi tingkat deforestasi dan degradasi hutan dan akan memberikan tolok ukur mengenai dampak deforestasi dan degradasi terhadap siklus air, energi, dan karbon di berbagai skala bentang alam. Pengukuran berbasis lapangan, data udara dan satelit yang diperoleh melalui PANGEA juga

akan memberikan data penting untuk menilai kemampuan Model Sistem Bumi dalam merepresentasikan daur ulang curah hujan di berbagai benua.

### 3.3 Proyeksi

#### 3.3.1 Proyeksi: Siklus Karbon, Air, Energi, dan Nutrisi

Pola curah hujan di masa depan di seluruh wilayah tropis masih belum pasti, tetapi simulasi model sistem bumi menunjukkan bahwa curah hujan tahunan rata-rata di Amerika Selatan mungkin akan berkurang, sementara curah hujan tahunan rata-rata di Afrika Tengah mungkin akan tetap sama atau bahkan meningkat (Dobler et al., 2024). Namun, stabilitas curah hujan tahunan rata-rata tidak berarti stabilitas siklus hidrologi. Sebagai contoh, musim hujan dapat menjadi lebih jelas dengan variabilitas antar tahun yang lebih kuat (Gloor et al., 2013), dan tren pemanasan dapat meningkatkan kekeringan di atmosfer dan tanah, meskipun curah hujan tetap sama dengan rata-rata historis (Cook et al., 2020; Ukkola et al., 2020). Dampak CO<sub>2</sub> atmosfer terhadap hidroklimat bergantung pada berbagai faktor yang saling berinteraksi dan tidak pasti. Sebagai contoh, CO<sub>2</sub> yang tinggi dapat mengurangi transpirasi di tingkat daun karena konduktansi stomata yang lebih rendah (Sampaio et al., 2021), tetapi perubahan indeks luas daun dan jumlah stomata juga akan memengaruhi respons di tingkat ekosistem (Li et al., 2018). Deforestasi dan degradasi hutan di seluruh Amazon (Spracklen et al., 2018; Baudena et al., 2021) berpotensi memengaruhi curah hujan melalui dampak besar terhadap evapotranspirasi, intersepsi tajuk, limpasan, dan penyimpanan air (Heerspink et al., 2020), meskipun terdapat ketidakpastian yang besar mengenai besarnya efek ini dalam studi pemodelan (misalnya, Pires dan Costa, 2013; Swann et al., 2015).

Perubahan hidroklimat, emisi CO di atmosfer, tutupan lahan dan perubahan tata guna lahan juga berinteraksi dengan perubahan siklus unsur hara, dan memahami umpan balik ini sangat penting. Ketersediaan fosfor dan kalium memengaruhi produktivitas primer bersih selama kekeringan (Manu et al., 2024), dan nitrogen dapat menjadi faktor pembatas yang penting pada hutan sekunder (Davidson et al., 2007). Penelitian menunjukkan bahwa efek pemupukan CO<sub>2</sub> dapat sangat berkurang ketika fosfor menjadi faktor pembatas (Yang dkk., 2016; Fleischer dan Terrer 2022). Namun, pemahaman kami tentang umpan balik antara siklus hara dan pendorong lainnya (iklim, pemupukan CO<sub>2</sub>, dan tutupan lahan serta perubahan penggunaan lahan) berasal dari eksperimen manipulatif kecil yang terlokalisasi, sehingga membuat penskalaan ke bentang alam yang sangat heterogen dan skala benua menjadi tantangan (Townsend et al., 2008). Dengan mengintegrasikan pengukuran terkoordinasi di berbagai bentang alam dan skala, PANGEA akan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- **Q22.** Bagaimana perubahan pola curah hujan, peningkatan suhu, dan pergeseran dinamika gangguan di hutan tropis akan mengubah **keseimbangan air di daratan** melalui perubahan waktu dan durasi curah hujan musiman, evapotranspirasi, dan kelembapan tanah?
- **Q23.** Bagaimana **perubahan vegetasi di masa depan**, termasuk deforestasi, degradasi, dan pertumbuhan kembali, akan berdampak pada iklim dan hidrologi lokal, regional, dan kontinental?
- **Q24.** Bagaimana peningkatan suhu, CO<sub>2</sub> atmosfer, dan kejadian iklim ekstrem berdampak pada **ketersediaan unsur hara** dan **interaksi tanah-vegetasi**?

Dengan mempertimbangkan bahwa pertanyaan-pertanyaan tersebut akan mengeksplorasi simulasi perubahan di masa depan di seluruh wilayah tropis, PANGEA akan menggunakan model berbasis

proses (*Bagian 6.3*) yang akan terintegrasi penuh dengan penginderaan jarak jauh (*Bagian 6.2*). Sebagai contoh, untuk menginisialisasi model mekanistik berbasis kohort dan individu dengan struktur dan komposisi hutan yang teramati dan realistis di seluruh gradien lingkungan, PANGEA akan mengintegrasikan data multispektral, hiperspektral, lidar, dan radar yang dikumpulkan baik melalui kampanye udara PANGEA maupun dari pengukuran satelit (**GEDI, EMIT, VIIRS, Sentinel-3, NISAR\***, pencitraan inframerah gelombang pendek **SBG**). Hubungan yang muncul berdasarkan penginderaan jarak jauh yang berkaitan dengan struktur, komposisi, dan fungsi hutan (*Bagian 3.1.2*) serta variabel hidroklimat dan tekanan air yang diindera dari jarak jauh (*Bagian 3.1.3*) akan digunakan untuk menilai dan mengurangi ketidakpastian model. Selain itu, konsentrasi hara tajuk yang diperkirakan dari pengambilan data penginderaan jauh hiperspektral yang dipandu oleh karakteristik geomorfologi yang berasal dari lidar akan digunakan untuk menginformasikan pola dan faktor pendorong distribusi hara di lanskap hutan tropis yang heterogen. Model yang telah dioptimalkan kemudian akan diterapkan pada berbagai simulasi representatif untuk mengukur dan membedakan peran perubahan iklim, CO atmosfer, tutupan lahan, dan penggunaan lahan dalam mendorong perubahan siklus biogeofisik dan biogeokimia.

### 3.3.2 Proyeksi: Ketahanan Hutan Heterogen

Perubahan iklim dan perluasan deforestasi dan degradasi hutan di wilayah tropis kemungkinan besar akan membuat hutan lebih sering terpapar gangguan antropogenik dan alami (Seidl et al., 2017; Lapola et al., 2023). Pergeseran rezim gangguan yang meluas akan berdampak besar pada struktur, komposisi, dan fungsi ekosistem, dan pada gilirannya pada berbagai jasa ekosistem lokal, regional, dan global yang disediakan oleh hutan tropis (Malhi dkk., 2014). Namun, dampak jangka panjang perubahan rezim gangguan pada hutan tropis pada akhirnya akan bergantung pada beberapa faktor yang masih belum dipahami dengan baik di ekosistem tropis: (1) dampak relatif perubahan intensitas dan frekuensi gangguan (Williams et al., 2013); (2) variabilitas ketahanan terhadap gangguan dan pemulihan pascagangguan pada berbagai spesies dan bentang alam (Anderson-Teixeira et al, 2013, Powell dkk., 2018; Liu dkk., 2022); (3) interaksi antara berbagai gangguan yang berdampak pada wilayah yang sama; (4) umpan balik antara pergeseran struktur dan komposisi hutan yang disebabkan oleh gangguan dan gangguan berikutnya atau tambahan (Silvério dkk., 2019; Brando dkk., 2020b); dan (5) dampak gangguan terhadap jasa ekosistem dan mata pencaharian masyarakat (Mamalakos dkk., 2021). Memajukan kuantifikasi berbasis pengamatan dan pemahaman proses terhadap faktor-faktor ini sangat penting untuk meningkatkan kemampuan pemodelan. Oleh karena itu, penelitian di PANGEA akan menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut:

- **Q25.** Dalam iklim yang terus berubah, *tipe hutan yang secara fungsional berbeda mana* yang paling rentan untuk menjadi sumber karbon ke atmosfer, tipe hutan mana yang tahan banting, dan mengapa?
- **Q26.** Bagaimana pemanasan iklim dan pergeseran kejadian ekstrem berinteraksi dengan tutupan lahan dan perubahan penggunaan lahan untuk mempengaruhi *pergeseran rezim kebakaran* dan umpan baliknya terhadap fungsi hutan dan iklim?
- **Q27.** Bagaimana perubahan iklim dan kejadian ekstrem di masa depan akan berdampak pada siklus karbon di dalam hutan tropis, dan berapa ambang batas ketika hal ini akan mengakibatkan *transisi skala besar* dalam komposisi fungsional dan/atau wilayah tersebut menjadi sumber karbon bersih?

- **Q28.** *Bagaimana perubahan iklim dan tata guna lahan berinteraksi dengan perubahan kerentanan hutan tropis, sehingga mempengaruhi ketersediaan jasa ekosistem dan akses terhadap **manfaat tambahan sosial-ekologis**, termasuk ketersediaan air, produksi pertanian, kesehatan manusia, pengurangan risiko bencana, dan praktik-praktik budaya?*

Model sistem berbasis proses dan sosial-ekologi (misalnya, model berbasis agen, bioekonomi, ketidakseimbangan, atau jaringan) akan digunakan untuk mengukur dampak perubahan rezim gangguan terhadap hutan tropis yang sangat beragam, dan konsekuensi terhadap penyediaan dan layanan ekosistem yang dapat berdampak pada kegiatan ekonomi dan mata pencaharian Masyarakat Adat dan Masyarakat Setempat. Untuk model berbasis proses, PANGEA akan menggunakan pendekatan yang sama seperti yang dijelaskan pada *Bagian 3.3.1* untuk menghasilkan kondisi awal dan kondisi batas. Demikian juga, hubungan yang muncul antara keanekaragaman fungsional dan tingkat pemulihan akan diperoleh dengan menggunakan data dari pengukuran berbasis lapangan dan penelitian sosial-ekologi yang dilakukan dengan peneliti lokal dan masyarakat, kampanye udara yang dikombinasikan dengan aliran data dari SIF (**TROPOMI, OCO-2/3, FLEX \***), pengukuran inframerah termal (**ECOSTRESS, GOES-R, MTG- I**), dan kronosekuensi pemulihan ekosistem berdasarkan penginderaan jarak jauh (*Bagian 3.2.3*). Untuk mengukur dampak hutan tropis terhadap manfaat tambahan sosial-ekologis, PANGEA akan melakukan penelitian sistem sosial-ekologis terpadu untuk lebih memahami pola dan pengaruh penggunaan lahan dan perubahannya, termasuk deforestasi, degradasi, restorasi hutan, kekeringan dan banjir, rezim kebakaran, dan suhu ekstrem di seluruh bioma tropis. PANGEA juga akan mempelajari umpan balik antara sistem sosial dan ekologi, mulai dari pengelolaan hutan tradisional, lokal, dan masyarakat adat hingga sistem industri, serta bagaimana sistem ini mempengaruhi ketahanan ekosistem dan penyediaan jasa ekosistem. PANGEA akan mengintegrasikan data sosial dan ekologi ke dalam model yang sudah ada (misalnya, Andersen dkk., 2017; von Essen dan Lambin, 2023) dan mengembangkan model-model baru untuk menangkap umpan balik dalam sistem sosial-ekologi di bawah kondisi ekonomi, budaya, lingkungan, dan tata kelola yang berbeda.

## 4 Kemajuan Ilmiah dan Teknis dari PANGEA

PANGEA akan memanfaatkan upaya ilmiah yang telah dilakukan selama puluhan tahun, termasuk proyek-proyek besar seperti LBA (Avissar dkk., 2002; Davidson dkk., 2012), jaringan plot inventarisasi hutan internasional (misal, ForestPlots.net dkk., 2021), dan berbagai upaya pengembangan model, termasuk (tetapi tidak terbatas pada) Kantor Pemodelan dan Asimilasi Global (GMAO) NASA, GISS BiomeE NASA (Weng dkk., 2022), dan model FATES yang didukung oleh DOE yang sedang dikembangkan sebagai bagian dari NGEE-Tropis (Koven dkk., 2020; Huang dkk., 2020; Xu dkk., 2023; Knox dkk., 2024; Shuman dkk., 2024). Terlepas dari upaya-upaya tersebut, upaya untuk menilai ketahanan hutan tropis terhadap gangguan masih menunjukkan hasil yang tidak konsisten. Studi lapangan menunjukkan bahwa hutan Afrika Tengah mungkin lebih tahan terhadap perubahan kondisi iklim dan dapat menjadi penyerap karbon jangka panjang dibandingkan dengan hutan tropis lainnya (Hubau dkk., 2020; Bennett dkk., 2021). Namun, studi penginderaan jarak jauh satelit menunjukkan bahwa hutan Afrika Tengah sama sensitifnya terhadap anomali iklim seperti halnya hutan Amazon dan hutan tropis lainnya (Liu et al., 2017; Palmer et al., 2019). Ketidakkonsistenan antara pengukuran lapangan dan pengamatan satelit harus direkonsiliasi untuk memprediksi dampak perubahan iklim terhadap peran hutan-hutan ini dalam siklus karbon dan air global. Beberapa faktor dapat menjelaskan ketidakkonsistenan ini, termasuk (1) perubahan tingkat kematian pohon, (2) sensitivitas fotosintesis yang berbeda, laju respirasi, dan proses ekosistem lainnya, (yang mengubah fluks karbon dan air bersih), terhadap gangguan alami dan antropogenik, (3) intensitas dan pola deforestasi dan degradasi yang berbeda terhadap struktur dan fungsi ekosistem, (4) lintasan evolusi yang berbeda yang menghasilkan keanekaragaman hayati yang unik dan interaksi spesies yang secara langsung memengaruhi ketahanan ekosistem (mis, kelimpahan megafauna yang berbeda-beda di seluruh hutan tropis), dan (5) data spasial dan temporal yang terbatas serta model yang tidak lengkap atau kurang berkembang.

PANGEA akan menyelidiki faktor-faktor yang dapat menjelaskan perbedaan respon hutan tropis di benua yang berbeda, ketidakkonsistenan (seperti yang telah disebutkan di atas), dan faktor-faktor lain yang ditentukan oleh komunitas PANGEA, dengan menambahkan pandangan pan-tropis untuk mendapatkan pengetahuan baru dari pengukuran penginderaan jauh multidimensi yang disempurnakan dengan pengukuran yang terkolokasi dan bertepatan serta analisis baru. PANGEA menekankan pada integrasi pengukuran di lapangan, dan kumpulan data penginderaan jauh untuk hutan tropis, mendukung algoritma penginderaan jauh dan pengembangan model, serta integrasi model-data. Kami memperkirakan kemajuan ilmiah yang signifikan dari pengukuran jarak jauh yang terkoordinasi dan terkolokasi, pengukuran lapangan, dan penggunaan informasi pemangku kepentingan termasuk yang berasal dari Pengetahuan Ekologi Pribumi, Tradisional, dan Lokal yang tertanam dalam upaya ilmiah kolaboratif yang mengedepankan transdisipliner. Untuk memajukan kemampuan dan solusi ilmiah dan teknologi, PANGEA akan

- **Menjelaskan** pola perubahan lanskap hutan tropis, dinamika, dan umpan balik, serta perbedaan geografisnya, dengan penekanan pada perbandingan antara Amerika dan Afrika.
- **Meningkatkan** pemahaman mengenai proses-proses yang mengendalikan heterogenitas dan kerentanan lanskap hutan tropis terhadap perubahan struktural dan fungsional.
- **Memajukan** kemampuan penginderaan jarak jauh untuk mengukur, memetakan, dan memantau keanekaragaman hayati, dinamika siklus karbon, dan sistem pertanian.

- **Memberikan** proyeksi yang lebih baik mengenai perubahan lanskap hutan tropis di masa depan, yang akan mencakup umpan balik dari iklim lokal, regional, dan global serta sistem sosial-ekologi.

***Kemajuan ilmiah ini akan dimungkinkan oleh kemajuan teknis:***

- **Integrasi** pengambilan data penginderaan berbasis darat dan penginderaan jarak jauh, yang mengarah pada kalibrasi yang lebih andal untuk variabel penginderaan jarak jauh;
- **Penskalaan** data dan alur kerja untuk analisis data penginderaan jauh dan tanah yang terintegrasi;
- **Kemajuan** dalam penggunaan AI dan pembelajaran mesin untuk asimilasi, fusi, dan penskalaan data;
- **Pengembangan** integrasi model data yang meningkatkan representasi komponen-komponen penting secara fungsional dari keanekaragaman hutan tropis yang dapat diukur dengan penginderaan jauh;
- **Meningkatkan** akurasi dan validasi, serta **menyempurnakan** estimasi ketidakpastian untuk produk data turunan penginderaan jauh.

PANGEA akan mengkarakterisasi struktur dan fungsi ekosistem di berbagai dimensi, mulai dari ekosistem hutan tropis yang masih utuh hingga yang terdegradasi, serta ekosistem hutan tropis yang memiliki keanekaragaman tinggi hingga rendah. PANGEA akan mengukur keanekaragaman taksonomi dan filogenetik pohon, serta tingkat demografi vegetasi, dengan menggunakan data lapangan yang ada dari plot inventarisasi hutan jangka panjang, dan keanekaragaman fungsional dan struktural menggunakan penginderaan jauh. Citra penginderaan jauh hiperspektral yang bersamaan dan pengukuran sifat daun secara insitu akan memetakan sifat-sifat kanopi dan komunitas fungsional yang berbeda, di samping mengevaluasi model-model yang dapat diukur dengan memanfaatkan pengukuran satelit. Dengan menggunakan output ini, kami akan mengkarakterisasi perbedaan-perbedaan yang ada di seluruh gradien abiotik, penggunaan lahan, dan biotik. Peningkatan yang dihasilkan dalam pemahaman kami mengenai distribusi sifat akan meningkatkan model fluks ekosistem di bawah pengaruh perubahan iklim dan perubahan tata guna lahan dan memungkinkan kami untuk mengevaluasi perbedaan dalam respon ekosistem. Dengan kombinasi pengukuran dan model ini, PANGEA akan membahas bagaimana struktur dan fungsi hutan tropis yang berbeda mempengaruhi stabilitas hutan tropis dalam menghadapi dampak penggunaan lahan dan perubahan iklim.

Integrasi data penginderaan jauh dan data berbasis lapangan dengan pengembangan dan penilaian model merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari PANGEA (*Bagian 6.3*). Pengukuran in situ dan penginderaan jarak jauh (misalnya, hiperspektral dan lidar) di seluruh gradien kritis akan digunakan untuk mengurangi ketidakpastian parameter dan memberikan kondisi awal dan batas untuk model berbasis proses. Tim PANGEA akan menggunakan kecerdasan buatan dan model pembelajaran mesin untuk mendapatkan kumpulan data sintesis yang menskalakan pengukuran di lokasi PANGEA yang intensif dan lokasi mitra ke domain inti dan domain PANGEA yang diperluas dengan menggunakan penginderaan jarak jauh satelit. Kumpulan data sintesis ini akan digunakan untuk membuat parameter dan tolok ukur model berbasis proses dan model sistem sosial-ekologi dalam skala besar dan akan memberikan kondisi batas untuk model terbalik. Integrasi model dan data akan menjadi hal yang mendasar untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan kunci PANGEA (*Bagian 3*), yang akan menjadi dasar bagi berbagai penelitian yang bertujuan untuk (1) memahami peran keragaman struktural dan

fungsional dalam mengendalikan siklus karbon, air, energi, dan hara di hutan tropis; (2) menginvestigasi bagaimana peningkatan kadar CO<sub>2</sub> dan peningkatan temperatur secara khusus mempengaruhi tingkat penyerapan karbon di hutan tropis; (3) menghitung dampak dari kejadian ekstrem, seperti kekeringan parah, terhadap kesehatan hutan dan emisi CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>; (4) memajukan pemahaman mengenai konsekuensi deforestasi dan degradasi hutan terhadap keanekaragaman hayati, siklus biogeofisik dan biogeokimia, jasa ekosistem, dan hidroklimat; (5) mengevaluasi keefektifan strategi restorasi terhadap ketahanan hutan tropis dan mitigasi perubahan iklim; dan (6) mengkarakterisasi risiko hutan tropis yang mengalami transisi kritis ke kondisi alternatif akibat perubahan iklim, deforestasi, dan degradasi hutan, serta menentukan peran keanekaragaman hayati dalam memitigasi kerentanan tersebut.

## 5 Peran Penting Penginderaan Jauh NASA

***PANGEA bertujuan untuk menentukan apakah hutan tropis yang berbeda akan memiliki nasib yang sama atau berbeda dalam menanggapi dampak perubahan iklim dan penggunaan lahan, dengan fokus khusus pada benua Afrika dan Amerika yang memiliki dua hutan tropis terbesar di dunia.***

Mengidentifikasi proses yang menghasilkan stabilitas hutan tropis sangat penting untuk membatasi ketidakpastian dalam prediksi dinamika fluks karbon terestrial di masa depan. Untuk merekonsiliasi perbedaan antara set data lapangan dan satelit, meningkatkan strategi penskalaan, memajukan pemantauan di masa depan, dan mengkarakterisasi bagaimana dan mengapa hutan tropis Afrika Tengah dan Amerika berbeda dalam hal ketahanannya terhadap perubahan iklim yang cepat, kita membutuhkan pengambilan data dari udara yang terkoordinasi. Sebagai contoh, resolusi spasial yang cukup tinggi (~2-5 m) diperlukan untuk mengukur dinamika daun dan pohon di tingkat organisme secara memadai pada bentang alam, yang berfungsi sebagai perantara antara pengukuran lapangan dan pengamatan satelit (**Gambar 14**). PANGEA dibangun berdasarkan perkembangan dan keberhasilan penskalaan dari NASA ABoVE di Amerika Utara (misalnya, Virkkala dkk., 2021; Peltola dkk., 2019; Braghiere dkk., 2023), yang memberikan cahaya baru pada sistem Arktik yang sebelumnya tidak banyak diketahui.

Untuk mencapai tujuan sainsnya, PANGEA akan memanfaatkan Program Sains Udara NASA untuk memperoleh data resolusi tinggi dari lidar hiperspektral, small-footprint lidar, radar bukaan sintetis (SAR), dan sistem penginderaan jarak jauh lainnya di hutan tropis di Afrika Tengah dan Amerika. Memperoleh data resolusi spasial- dan spektral- yang tinggi di wilayah-wilayah ini mendukung evaluasi dinamika hutan yang belum pernah terjadi sebelumnya, termasuk fluks, pertumbuhan, mortalitas, dan strategi fungsional (mis. efisiensi penggunaan nutrisi dan air, fenologi) pada resolusi individu pohon di lanskap besar yang bervariasi dalam komposisi spesies, karakteristik tanah, topografi, rezim gangguan, dan interaksi dengan manusia.

Cakupan awan yang persisten merupakan masalah yang signifikan ketika menggunakan XCO<sub>2</sub> dan XCH<sub>4</sub> berbasis ruang angkasa untuk membatasi fluks gas rumah kaca tropis (misalnya, Rayner dkk., 2002; Qu dkk., 2021). Bahkan pada resolusi spasial yang lebih tinggi dari sensor satelit yang mengorbit rendah di Bumi saat ini yang mengambil data XCH<sub>4</sub> (misalnya, **TROPOMI** [3,5 km x 7,0 km]) dan XCO<sub>2</sub> (misalnya, **OCO-2** [1,3 km x 2,2 km]), lebih dari 95% informasi yang diambil disaring karena awan di daerah tropis (Qu dkk., 2021). Sensor satelit XCO<sub>2</sub> dan XCH<sub>4</sub> dengan resolusi spasial yang

lebih tinggi seperti MethaneSat yang baru saja diluncurkan (100 m x 400 m) akan sangat meningkatkan kemampuan untuk mengambil fluks tropis melalui celah awan. Sensor satelit pemetaan sumber titik lainnya (misalnya, **EMIT**, **GHGSat**, **Carbon Mapper**, **PRISMA**) telah diluncurkan dengan resolusi spasial yang sangat tinggi (<100 m x 100 m). Namun, pengamatan dengan mode target ini tidak akan memberikan cakupan global yang dibutuhkan untuk membatasi anggaran gas rumah kaca tropis. Tutupan awan juga akan mempengaruhi estimasi suhu permukaan lahan dan evapotranspirasi dari penginderaan jarak jauh termal, yang akan membutuhkan pendekatan koreksi bias (Van Niel dkk., 2012).

PANGEA akan memperoleh berbagai macam pengamatan udara dan darat yang bertepatan dengan satelit-satelit NASA yang sudah ada (misalnya, **OCO-2/3**, **EMIT**, **PACE**, **VIIRS**, **SMAP**, **GRACE**, **SWOT**, **AMSR-E**, **AMSR2**, **ICESat-2**, **Landsat**, **GED**), satelit internasional (misalnya, **TROPOMI**, **GOSAT**, **GOSAT-2**, **CO2M**, **RADARSAT**, **Envisat**, **PRISMA**, **DESI**), dan produk satelit komersial (mis., **GHGSat**, **MethaneSat**, **WorldView**, **QuickBird/GeoEye**, **Planet**). Pengamatan-pengamatan ini akan membantu dalam validasi pengambilan data dari satelit-satelit tersebut mengenai struktur hutan, sifat-sifat daun, keanekaragaman hutan, genangan, curah hujan, dinamika gangguan, dan komposisi atmosfer. Mereka juga akan membantu dalam menilai kemampuan sensor satelit yang direncanakan di masa depan (misalnya, **NISAR**, **SBG**, **BIOMASS**, **CHIME** (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment), **GLIMR**, **FLEX**, **Carbon Mapper**) dan strategi pengamatan. PANGEA akan memungkinkan untuk menyelidiki karakteristik instrumen yang diperlukan (misalnya, presisi, akurasi, resolusi spasial/spektral) dan strategi pengamatan (misalnya, orbit Bumi rendah versus geostasioner) untuk memantau emisi rumah kaca dan berbagai variabel yang mendorong dinamika sumber-tenggaram tropis.

## 6 Strategi Penelitian dan Desain Studi

Serupa dengan proyek-proyek NASA sebelumnya, PANGEA akan memungkinkan para peneliti untuk mempelajari pertanyaan-pertanyaan ilmiah utama (*Bagian 3*) dengan menanggapi panggilan proposal NASA. Pendanaan bersama akan dicari; oleh karena itu kami menyajikan desain proyek yang modular dan fleksibel. Penelitian akan mengintegrasikan investigasi dan model sains berbasis darat, udara, dan satelit untuk memungkinkan interpretasi yang efektif terhadap data berbasis satelit saat ini dan di masa depan. Berdasarkan proyek-proyek NASA sebelumnya di daerah tropis, PANGEA akan dirancang bersama dengan lembaga dan mitra lokal untuk memfasilitasi kolaborasi dan membangun hubungan baru dalam komunitas ilmiah, dengan penekanan khusus pada interaksi di antara para ilmuwan dari Amerika Serikat dan negara-negara hutan tropis. Selama tahun-tahun pendefinisian ilmu pengetahuan dan proyek, PANGEA akan bekerja untuk melibatkan dan melatih para ilmuwan karir awal, baik dari AS maupun institusi hutan tropis lokal. PANGEA akan meninggalkan warisan berupa data terbuka, ilmu pengetahuan terbuka, peningkatan kapasitas, dan kemitraan yang kuat, yang akan menjadi dasar yang kuat untuk penelitian di masa depan.

## 6.1 Pendekatan Studi Keseluruhan

**Memahami hutan tropis pada skala global dan relevan dengan kebijakan membutuhkan penginderaan jarak jauh satelit.**

Kegunaan penginderaan jarak jauh pada hutan tropis bergantung pada data multiskala dan integrasi pengetahuan. Banyaknya data satelit, data dari udara dan data dari darat yang baru sekarang dapat dipasangkan dengan kemampuan baru untuk analisis data. Saat ini juga terdapat kapasitas yang jauh lebih besar untuk melakukan analisis intensif secara numerik dibandingkan dengan proyek-proyek TE NASA sebelumnya seperti LBA, dengan komputasi awan, sumber daya komputasi yang canggih, dan pembelajaran mesin dan kemampuan AI yang berkembang pesat untuk klasifikasi, regresi, dan prediksi. Namun, kelangkaan pengamatan dan data label untuk melatih dan memvalidasi model AI yang haus data, dan pengetahuan proses ekologi yang terbatas untuk wilayah tropis hingga saat ini, telah menyebabkan tantangan yang signifikan dalam meningkatkan produk satelit dan menginterpretasikan temuan ilmiah yang diperoleh dari produk ini. Ketidaksesuaian skala masih ada untuk pengambilan yang diinginkan dari hampir semua satelit di daerah tropis. Untuk mengatasi keterbatasan ini dan memajukan kegunaan penginderaan jauh satelit di atas bioma hutan tropis, PANGAEA dibangun berdasarkan pendekatan penskalaan yang dikembangkan selama proyek-proyek lapangan TE NASA sebelumnya seperti BOREAS, LBA, dan ABoVE. PANGAEA akan merekonsiliasi ketidaksesuaian skala melalui pengukuran di lapangan, menara, drone, pesawat terbang, dan satelit yang dikolaborasikan dengan kemajuan dalam pemahaman proses yang mendukung teori penskalaan. *Bagian 6* selanjutnya menjelaskan Strategi Sains untuk Meningkatkan Skala (*Bagian 6.1.1*), Garis Waktu Nisbi (*Bagian 6.1.2*), Pengukuran Ilmiah Esensial di seluruh skala (*Bagian 6.2*), serta pendekatan Pemodelan, Sintesis Data, dan Analisis Integratif untuk menggabungkan semuanya (*Bagian 6.3*).

### 6.1.1 Strategi PANGAEA untuk Meningkatkan Skala Ilmu Pengetahuan

**Desain pengambilan sampel bersarang dan strategi science-to-scale PANGAEA memberikan peluang untuk memajukan pemantauan satelit, pengembangan produk, asimilasi data, dan perbandingan proses dalam model ekosistem generasi berikutnya. Kemajuan ini secara signifikan dapat meningkatkan kemampuan para pemangku kepentingan dalam menerapkan model untuk meningkatkan pemahaman dan prediksi jangka panjang terhadap proses.**

Strategi PANGAEA untuk meningkatkan skala ilmu pengetahuan menerapkan pendekatan sistem terintegrasi yang mencakup mosaik lanskap kompleks yang meliputi hutan hingga lahan basah dan lahan gambut, hutan yang masih utuh hingga hutan yang terganggu, serta sistem pertanian dan sosial-ekologi. Untuk memastikan proses-proses yang terjadi di berbagai kondisi lingkungan dan berbagai sumber data-sensor di darat, menara, drone, dan pesawat-proyek-proyek lapangan dan udara PANGAEA akan mencakup pengambilan sampel pada berbagai gradien struktur dan fungsi ekosistem, iklim, geomorfologi, dan tanah, ketersediaan unsur hara, dan rezim gangguan. Memasukkan variabilitas ini sangat penting untuk skala regional dan pan-tropis serta untuk menginformasikan model dan memastikan bahwa model tersebut dapat dinilai dan dibandingkan dalam kondisi yang

berbeda, sehingga mengurangi risiko kesamaan - mendapatkan jawaban yang benar karena mengkompensasi alasan yang salah. Pemilihan gradien prioritas akan mempertimbangkan ketidakpastian saat ini dalam model, dan proses-proses baru yang belum pernah dinilai dengan data penginderaan jarak jauh dalam skala besar (misalnya, perubahan temporal dalam struktur dan komposisi kanopi, dan dampaknya terhadap fluks energi, air, dan karbon; respon hidrolis tanaman terhadap variabilitas iklim).

**Pengambilan data penginderaan jauh suborbital (misalnya, drone dan pesawat terbang) sangat penting untuk menyelaraskan antara pengukuran di lapangan dan pengambilan data satelit yang beresolusi lebih rendah. PANGEA berdiri di atas pundak proyek-proyek lapangan dan udara NASA yang sangat sukses di Afrika dan Amerika, termasuk SAFARI 2000, AfriSAR-1 dan -2, BioSCape, dan beberapa misi Earth Venture Suborbital (EVS).**

Perbedaan antara jejak sekitar 1 km dari fluks kovarians eddy berbasis menara dan pengambilan data satelit beresolusi >2 km untuk produktivitas primer bruto, fluks metana, dan respirasi ekosistem memerlukan rekonsiliasi (misalnya, Li et al., 2018). Demikian pula, pengambilan atribut struktural tingkat pohon dan tajuk dari lidar diperlukan untuk menghubungkan proses dan dinamika organisme dengan respons ekosistem yang diamati pada skala bentang alam. Selain itu, variasi vertikal dalam struktur hutan telah terbukti bervariasi sesuai dengan fungsi ekosistem, bahkan ketika metrik yang terintegrasi secara vertikal seperti indeks luas daun (LAI) tidak (Ordway et al., 2022). Lidar dari luar angkasa menghasilkan pengamatan skala komunitas yang, meskipun sangat berharga, masih belum cukup untuk dipasangkan dengan pengukuran in-situ di tingkat pohon. Karena data yang diambil dari luar angkasa ini melebihi dimensi tajuk pohon, data ini tidak mendukung pengambilan metrik tingkat tajuk dan pohon, atau metrik ekosistem berskala kecil seperti deteksi celah tajuk dan mortalitas pohon.

Contoh lainnya adalah penggunaan data penginderaan jauh hiperspektral untuk memperkirakan metrik keanekaragaman hayati. Pengambilan data hiperspektral dari bagian atas tajuk dari EMIT, PACE, SBG, dan CHIME memiliki potensi untuk menghasilkan pengambilan data langsung keanekaragaman spektral tanaman (Cawse-Nicholson et al., 2021; Schimel et al., 2020), yang juga dapat digunakan untuk memperkirakan keragaman ekosistem (Féret dan Asner, 2014) dan keragaman beta (Schweiger dan Laliberte, 2022), keragaman fungsional tanaman (Cawse-Nicholson dkk., 2021; Rocchini dkk., 2022; Thompson dkk., 2021), dan dalam beberapa kasus, keragaman taksonomi tanaman (Schimel dkk., 2020; Rossi dan Gholizadeh, 2023). Penggabungan pengambilan dan metrik ini dengan data dan pengetahuan mengenai pergerakan hewan, interaksi tumbuhan-hewan, kumpulan komunitas multi-taksa, dan variasi struktural ekosistem dari IEK, TEK, dan LEK, serta eDNA, bioakustik, perangkat kamera, dan set data penginderaan jarak jauh lainnya (misalnya, **GEDI**, **NISAR**, **SWOT**) berpotensi menghasilkan estimasi keanekaragaman hayati tidak langsung dan proksi. Pendekatan integratif ini dapat, misalnya, meningkatkan implementasi program insentif berbasis karbon (Castro-Magani et al., 2021), atau meningkatkan layanan nasional, dan memaksimalkan manfaat sosial (Schiavon et al., 2023). Namun, data kalibrasi dan validasi di daerah tropis, untuk menguji generalisasi algoritma yang ada, saat ini masih kurang. Sebagai contoh, resolusi spektral yang tepat, ukuran piksel, dan koeksistensi beberapa spesies pohon dalam satu piksel tertentu, atau resolusi temporal untuk mengukur proses diurnal yang terkait dengan spesies tersebut perlu ditangani dengan baik (Schimel dkk., 2020; Rocchini dkk., 2022). Keanekaragaman anggota tubuh merupakan salah satu pendekatan untuk mengatasi beberapa tantangan tersebut (Rossi dan Gholizadeh, 2023). Lebih lanjut, peta sifat fungsional masih memerlukan estimasi menggunakan model yang dikalibrasi

pada lokasi tertentu berdasarkan pengukuran sifat daun in situ (misalnya, Chadwick dan Asner 2016a), dan penelitian yang sangat terbatas telah dilakukan untuk mengeksplorasi penggabungan berbagai jenis data yang berbeda untuk mengembangkan metrik atau proksi berbasis proses (Mairota dkk., 2015; Schimel dkk., 2020; Ordway dkk., 2022; Portillo-Quintero dkk., 2022).

**PANGEA akan berkoordinasi dengan kerangka kerja penskalaan yang ada, memfasilitasi standarisasi metode pengumpulan data.**

Tim EMIT NASA secara aktif bekerja sama dengan National Ecological Observatory Network (NEON) untuk mengembangkan alur kerja penskalaan antara NEON dan data satelit sebagai persiapan untuk misi Surface Biology and Geology (SBG) NASA yang akan datang. Akuisisi darat dan udara PANGEA akan memperluas alur kerja ini ke daerah tropis. PANGEA juga akan berkoordinasi dengan upaya yang didanai NASA yang sudah ada seperti [CMS4D](#), sebuah sistem prototipe fusi data multiskala untuk pemantauan dinamika karbon dari luar angkasa. CMS4D, yang dipimpin oleh Carlos Alberto Silva, merupakan studi kasus di Cerrado, Brasil, yang berfokus pada dinamika kebakaran, yang memiliki banyak kesamaan alur kerja dengan PANGEA. Berkoordinasi dengan upaya-upaya tersebut untuk menstandarisasi dan menyelaraskan alur kerja pengumpulan dan penskalaan data akan membantu memastikan data yang konsisten dan berkualitas tinggi, sehingga memungkinkan kolaborasi yang lebih luas dan validasi silang terhadap hasil. Contoh yang sangat baik dari jenis kerja kolaboratif ini adalah High-Latitude Drone Ecology Network (HiLDEN) (<https://arcticdrones.org/>), yang ingin ditiru oleh PANGEA di bioma tropis. PANGEA juga akan memanfaatkan upaya kolaboratif berbasis lapangan lainnya, seperti inisiatif Society for the Protection of Underground Networks (SPUN), yang berfokus pada pengambilan sampel jamur mikoriza di area yang secara historis kurang tersampel (<https://www.spun.earth/>). Jaringan-jaringan ini menunjukkan kekuatan koordinasi dan keterlibatan di lapangan untuk menjembatani kesenjangan dalam data ekosistem, sebuah pendekatan yang akan diadopsi oleh PANGEA di berbagai skala penelitiannya. Pendekatan multiskala terhadap data lapangan, udara, dan satelit ini akan memajukan pemantauan satelit dan kapasitas model generasi mendatang untuk mensimulasikan proses-proses utama dan meningkatkan prediksi ekosistem jangka panjang.

Untuk memajukan penggunaan penginderaan jauh satelit secara efektif, diperlukan pengumpulan data dan informasi yang cermat, kreatif, dan bijaksana, serta integrasi pengetahuan di seluruh skala spasial dan temporal. Upaya terkoordinasi selama satu dekade selama NASA ABoVE telah memajukan pemahaman mengenai transisi dan non-linearitas bioma boreal, mengungkap tren peningkatan dan penurunan ketahanan secara spasial yang eksplisit (Zhang dkk., 2024) dan menghasilkan sistem tolok ukur model spesifik bioma yang baru (Stofferahn dkk., 2019). PANGEA akan dibangun berdasarkan teori penskalaan yang dikembangkan oleh ABoVE dan selanjutnya mengintegrasikan ML/AI dengan data penginderaan jauh untuk memajukan pengukuran dan pemantauan proses, dinamika, dan perubahan yang heterogen di seluruh wilayah hutan tropis, termasuk dinamika sumber/tenggalamnya fluks karbon, klasifikasi tata guna lahan, pemodelan distribusi spesies, estimasi indeks luas area, dan prediksi iklim. PANGEA menawarkan peluang untuk model numerik yang mewakili proses yang memediasi keanekaragaman hutan dan interaksi hutan yang heterogen secara struktural dengan iklim, penggunaan lahan, dan siklus biogeokimia (misalnya, Rödig dkk., 2019; Longo dkk., 2020; Schneider dkk., 2023). *Bagian 6.3.3* menjelaskan pendekatan pemodelan, sintesis data, dan integrasi PANGEA secara lebih rinci.

**PANGEA akan meningkatkan kemampuan kita untuk mendorong batas-batas dari apa yang dapat kita simpulkan dengan sensor satelit dan mendefinisikan batasan-batasan tersebut dengan lebih baik, sehingga memungkinkan komunitas penelitian untuk memfokuskan upaya dan sumber daya di mana kita membutuhkan informasi untuk melengkapi penelitian penginderaan jauh untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik mengenai fungsi hutan tropis.**

Tutupan awan yang terus-menerus, misalnya, merupakan keterbatasan penting bagi sensor optik di hutan tropis (contohnya, Landsat, EMIT, OCO-2/3). Meskipun aspek-aspek keanekaragaman hayati hutan tropis yang sangat besar dapat dipelajari dari luar angkasa, namun kecil kemungkinannya pengamatan dari luar angkasa dapat menggantikan inventarisasi spesies yang dilakukan melalui penelitian di darat. Taksa non-tumbuhan tidak mungkin dapat diungkap melalui investigasi berbasis satelit di hutan tropis, meskipun beberapa aspek keanekaragaman hayati non-tumbuhan dapat diprediksi dari data satelit. Kanopi tanaman yang lebat di hutan tropis juga menghalangi pandangan kita terhadap tanah dan dinamika di bawah permukaan tanah. Menginterogasi dan mengklarifikasi kemampuan dan batasan penginderaan jarak jauh di daerah tropis melalui kemajuan metodologis dan komputasi serta penggabungan data sangat dibutuhkan untuk memandu kegiatan penelitian dan implementasi di lapangan serta upaya pemantauan multiskala jangka panjang yang ditargetkan. Lihat *Lampiran D untuk Kegiatan Penelitian dan Pemantauan yang Direncanakan dan Sedang Berlangsung* yang dapat memperoleh manfaat dari PANGEA.

### 6.1.2 Jadwal Proyek Notional

Kantor Proyek PANGEA akan menyusun jadwal proyek yang pasti. Di sini, kami memberikan garis besar kegiatan utama proyek PANGEA yang akan dilaksanakan selama 6 hingga 9 tahun (lihat *Bagian 9.4*). Sebelum pelaksanaan proyek, PANGEA akan mengembangkan Rencana Percobaan Ringkas (CEP) selama fase Definisi Ilmu Pengetahuan yang berlangsung antara satu hingga dua tahun. Fase ini melibatkan pemilihan lanskap prioritas; menyempurnakan rencana pengumpulan data di darat, udara, dan satelit; mendefinisikan analisis untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan sains proyek; dan menentukan anggaran awal. Rencana Eksperimen Ringkas akan menjadi dasar bagi pengumuman NASA mengenai kesempatan untuk merekrut Tim Sains PANGEA Fase 1. Secara nominal, kami berharap NASA akan meminta proposal untuk partisipasi Tim Sains setiap tiga tahun. Setelah fase Definisi Sains dan pemilihan Tim Sains Fase 1, kami menganggap proyek PANGEA akan dilaksanakan selama sekitar 8 tahun, meskipun periode implementasi yang lebih lama atau lebih pendek dimungkinkan dengan menggunakan pendekatan yang fleksibel dan modular. Berbagai macam profil anggaran dan jadwal dapat dilakukan dengan pendekatan modular karena masing-masing kampanye memiliki ketergantungan yang terbatas. Fokus awal adalah membangun dan menambah lokasi lapangan dengan instrumentasi baru, serta analisis dan model data berbasis satelit untuk mengoptimalkan pengukuran di masa depan. Pengembangan model awal dan analisis data yang ada akan mengungkapkan sensitivitas terbesar yang akan memandu detail implementasi dan pengumpulan data kampanye. Puncak akuisisi data akan terjadi pada tahun ke-2-6, untuk memastikan bahwa sumber daya yang ada digunakan untuk akuisisi dengan hasil ilmiah tertinggi. Pada sintesis akhir selama tahun ke-7 dan ke-8, kegiatan lapangan akan dibatasi, dan PANGEA akan berkonsentrasi pada studi sintesis dan pemodelan yang secara ekstensif menggunakan data yang telah diperoleh sebelumnya.

## 6.2 Komponen Ilmiah Penting

**Mengatasi kesenjangan data dan pengetahuan di daerah tropis membutuhkan proyek-proyek darat dan udara yang terkoordinasi yang mencakup dua hutan tropis terbesar di Afrika dan Amerika.**

PANGEA memanfaatkan sejarah kampanye lapangan dan udara NASA yang sukses di daerah tropis untuk mengukur dinamika dan status ekosistem di akhir musim hujan dan akhir musim kemarau, saat sistem hutan tropis paling sedikit dan paling banyak mengalami tekanan, sehingga mengungkap perbedaan fungsional (Yang dkk., 2021b), dan tutupan awan yang lebat membatasi penginderaan jarak jauh di daerah tropis selama musim hujan. Pencapaian terbaru yang menunjukkan kelayakannya termasuk kampanye AfriSAR-2 yang sangat sukses yang mengumpulkan data UAVSAR L-band dan P-band dari udara di atas Kamerun, Republik Demokratik Kongo (RDK), Gabon, Ghana, Republik Kongo, dan Sao Tome dan Principe. Terlepas dari kampanye yang sukses ini, masih ada kebutuhan penting untuk pengukuran yang terkolokasi dan bersamaan di seluruh lanskap tropis yang sangat bervariasi, terutama di Afrika, di mana kesenjangan data adalah yang terbesar, dan pemahaman berbasis proses adalah yang paling buruk. Pengukuran yang terbatas pada musim kemarau berisiko menimbulkan bias pemahaman mengenai hutan tropis, mengingat perbedaan musiman yang kuat dalam dinamika dan proses (Cleveland dkk., 2015), termasuk siklus karbon, interaksi spesies, aktivitas penggunaan lahan (mis. kebakaran dan pembukaan lahan), siklus hidrologis, dan banyak lagi. PANGEA akan mengisi kesenjangan temporal yang penting dalam penginderaan jarak jauh dengan mengoordinasikan pengambilan data suborbital yang diatur waktunya pada akhir musim hujan dan akhir musim kemarau dengan perolehan data yang terus menerus dan/atau lebih sering dari menara fluks, pesawat tanpa awak, dan sensor lainnya. Oleh karena itu, untuk mencapai tujuan PANGEA, diperlukan kampanye penerbangan yang memenuhi persyaratan pengukuran yang dijelaskan pada *Bagian 6.2.1*, yang dilakukan di beberapa negara di Afrika Tengah dan Amerika tropis, untuk menjangkau berbagai lingkungan yang ada di sistem ini. Pengamatan ini akan menghubungkan pengukuran proses beresolusi tinggi (plot hutan, pengukuran ruang, menara fluks, eDNA, data pergerakan hewan, data pertanian, TEK, IEK, dan LEK) dengan pengambilan data penginderaan jarak jauh dari udara dan satelit yang ekstensif, sehingga memberikan garis dasar bagi kumpulan data berbasis darat, udara, dan satelit yang sedang berlangsung, serta memungkinkan dilakukannya perbandingan dengan penelitian-penelitian terdahulu.

**PANGEA menyediakan kerangka kerja untuk menskalakan dan mengintegrasikan pengambilan data melalui udara dan satelit dengan pengukuran lapangan in situ, pengukuran menara fluks eddy-covariance, dan model untuk memajukan pemahaman ilmiah dan kemampuan penginderaan jarak jauh di seluruh area tematik yang secara langsung menangani tujuan Area Fokus Siklus Karbon dan Ekosistem NASA, yang selaras dengan Area Fokus Siklus Air dan Energi serta Variabilitas dan Perubahan Iklim.**

PANGEA akan membangun jaringan kampanye lapangan dan udara terkoordinasi yang didistribusikan di seluruh ekosistem hutan tropis yang ditargetkan untuk mengisi kesenjangan data dan memungkinkan penskalaan antara set data lapangan dan penginderaan jarak jauh, serta pemodelan skala regional dan pantropis (**Tabel 2**). Dengan menggunakan set data yang terkoordinasi, PANGEA

akan mengkarakterisasi perbedaan-perbedaan yang ada pada gradien biotik, abiotik, dan tata guna lahan. PANGEA kemudian akan menggunakan pengukuran terintegrasi ini untuk memodelkan struktur, fungsi, dan fluks ekosistem di bawah skenario perubahan iklim dan tata guna lahan untuk mengevaluasi perbedaan respons ekosistem. Dengan demikian, PANGEA akan membahas bagaimana dinamika hutan tropis yang berbeda-beda mempengaruhi stabilitas hutan tropis dalam menghadapi dampak perubahan iklim dan tata guna lahan.

### 6.2.1 Strategi Dasar, Ambang Batas, dan Cakupan

Kami menurunkan tiga tingkat alternatif Pengukuran Ilmiah Esensial, yaitu **Baseline**, **Threshold**, dan **Descope**, dari Tujuan Ilmiah PANGEA untuk (1) memahami perbedaan stok dan fluks karbon tropis serta kekuatan yang mendorong heterogenitas, (2) menyelesaikan masalah penskalaan antara data lapangan dan satelit dengan memajukan pemahaman proses dan metode penskalaan, dan (3) meramalkan berbagai respons ekosistem hutan tropis terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan. Persyaratan Fungsional Investigasi PANGEA dijelaskan di bawah ini.

**Investigasi Dasar** memenuhi semua Tujuan Sains (*Bagian 1.1*) dan semua Pertanyaan Sains (*Bagian 3*) di 3-6 lanskap hutan tropis Amerika dan 3-6 lanskap hutan tropis Afrika. Untuk memenuhi Tujuan Investigasi Dasar ini, kami menetapkan persyaratan berikut:

1. Kumpulkan pengambilan data dari udara melalui mosaik jalur penerbangan dari dinding ke dinding dan transek pengambilan sampel pada minimal tiga lanskap prioritas di Afrika dan tiga lanskap prioritas di Amerika, di mana lanskap tersebut mencakup ratusan kilometer yang mencakup berbagai sistem sosial-ekologi-ekosistem dan masyarakat yang bergantung padanya (lihat *Bagian 6.2.3* dan *6.2.4* untuk detail pengukuran lanskap).
  - a. Pengambilan melalui udara akan mencakup satu penangkapan yang berhasil di akhir musim kemarau dan satu penangkapan yang berhasil di akhir musim hujan di setiap lanskap. Akhir musim kemarau (kering-ke-basah) dan musim hujan (basah-ke-kering) terjadi pada bulan-bulan yang berbeda di benua yang berbeda. Hutan tropis dapat memiliki musim unimodal (satu musim kemarau dan satu musim hujan), atau bimodal (dua musim kemarau dan dua musim hujan). Karena alasan ini, jadwal pengambilan akan ditentukan berdasarkan musim spesifik bentang alam.
  - b. Lanskap akan dipilih dari lokasi-lokasi kandidat selama pengembangan Rencana Percobaan Ringkas.
  - c. Analisis variabilitas yang dibangun pada **Gambar 11** dan analisis ketidakpastian model akan digunakan untuk memberikan informasi penting bagi pengguna akhir dan akan berkontribusi pada pemilihan lanskap selama pengembangan Rencana Percobaan Ringkas.
2. Kumpulkan pengukuran tanah yang bertepatan dan terkolokasi selama akuisisi udara untuk pengukuran yang diperlukan (misalnya, ciri-ciri kimiawi daun, pengukuran fluks ruang CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>).
3. Kumpulkan pengukuran lapangan yang sedang berlangsung pada frekuensi temporal yang diperlukan selama proyek berlangsung (misalnya, akuisisi fenologi dan mortalitas pohon berbasis drone dan lapangan bulanan, pengukuran fluks sub-jam).
4. Mengembangkan dan menerapkan pendekatan sintesis data untuk mengukur skala pengamatan lapangan dan udara pada Domain Inti PANGEA, dengan menggunakan data

satelit untuk mendapatkan estimasi terbatas (dan ketidakpastian) dari variabel-variabel yang diminati.

5. Mengevaluasi kemampuan transferabilitas produk sintesis data di seluruh Domain Inti melalui validasi silang.
6. Memodelkan fluks karbon, air, dan energi, serta dinamika vegetasi, menggunakan model biosfer terestrial yang diinisialisasi, diparameterisasi, dan dibandingkan dengan produk sintesis data berbasis penginderaan jauh.
7. Menerapkan model yang telah dioptimalkan untuk menguji stabilitas hutan tropis di dalam dan di antara semua lanskap investigasi dan secara regional berdasarkan hasil model biosfer terestrial dan sistem sosial-ekologi.
8. Memodelkan peran relatif iklim, tanah, dan sejarah evolusi yang berbeda dalam menentukan variasi stabilitas hutan tropis dalam menghadapi dampak iklim.

**Investigasi Ambang Batas** memenuhi semua Tujuan Ilmu Pengetahuan (*Bagian 1.1*) di dua bentang alam hutan tropis Amerika dan dua bentang alam hutan tropis Afrika. Investigasi Ambang Batas membutuhkan satu kali penangkapan melalui udara pada akhir musim hujan dan satu kali penangkapan melalui udara pada akhir musim kemarau di setiap lanskap.

**Penyelidikan Descoped** kami memenuhi semua Tujuan Sains (*Bagian 1.1*) hanya di dua lanskap di Afrika. Untuk daerah tropis Amerika, Penyelidikan Descoped kami mengandalkan data yang ada, kampanye yang direncanakan (lihat *Bagian 6.2.4*), pembelian data komersial, dan pesawat tanpa awak yang dapat dikerahkan, serta data satelit di atas Amerika sebagai perbandingan.

**Persyaratan peninjauan ulang secara temporal:** Dua kampanye udara terfokus dengan mosaik dari dinding ke dinding dan transek di berbagai lanskap diperlukan untuk menangkap variasi musiman dan memperhitungkan heterogenitas di dalam dan di antara benua dengan cara yang terstandarisasi. Waktu pelaksanaan survei akan memperhitungkan musim curah hujan di setiap lanskap. Untuk bentang alam yang memiliki dua musim kemarau, kampanye PANGEA akan berfokus pada musim kemarau terpanjang. Kampanye udara akan menangkap anggota akhir yang diperlukan untuk mengukur perbedaan musiman dalam hal fluks, stok, sifat, interaksi tanaman-hewan, hidrodinamika, interaksi atmosfer-darat, dan kebakaran serta aktivitas penggunaan lahan pertanian. Waktu yang berlalu antara dua penangkapan dan antara lanskap yang berbeda tidak akan memengaruhi kemampuan untuk menangkap anggota akhir ini, sehingga memungkinkan desain modular dan membangun fleksibilitas kampanye udara yang berharga. Dalam subbagian tingkat lanskap dari akuisisi udara ini (misalnya, 10-20 km<sup>2</sup>), pengambilan struktur dan spektrum hutan dengan drone frekuensi tinggi ( $\leq$  bulanan) akan memungkinkan kuantifikasi tren temporal berskala kecil (misalnya, mortalitas, fenologi) dan menyediakan data kalibrasi dan validasi untuk pengembangan metode satelit untuk memantau dinamika ini. Selain itu, selama proyek 6 hingga 9 tahun, kemungkinan besar peristiwa ekstrem, seperti kebakaran besar, kekeringan, atau peristiwa El Nino, akan terjadi, sehingga memberikan peluang lebih lanjut untuk analisis.

**Persyaratan variabilitas spasial:** Struktur, fungsi, fluks, dan keanekaragaman hayati ekosistem dikarakterisasi di seluruh gradien multi-dimensi dari sistem hutan tropis yang utuh hingga terdegradasi, keanekaragaman tinggi hingga rendah, dan stok karbon tinggi hingga rendah. **PANGEA mengimplementasikan pendekatan pengambilan sampel pada skala tertentu, dengan desain pengambilan sampel bersarang.** Pengukuran di darat dan udara akan menjangkau gradien di dalam

lanskap, dan lanskap menjangkau gradien iklim dan keanekaragaman hayati di dalam benua (**Gambar 11 dan 18**). Pengumpulan data PANGEA akan dilakukan pada bentang alam yang mencakup kondisi utuh, terganggu, dan terdegradasi di hutan, lahan gambut, dan ekosistem lahan basah, serta agroekosistem yang berdekatan. Pengumpulan data lapangan yang terkoordinasi dan bersamaan mengenai fluks, ciri-ciri daun, struktur hutan, kematian pohon, keanekaragaman fauna, interaksi spesies, kelembapan tanah, dan banyak lagi akan dikumpulkan di seluruh gradien ini di setiap lanskap. Untuk informasi lebih lanjut, lihat *Bagian 6.2.2, Kandidat Lanskap*, dan *Bagian 6.2.5, Pengamatan dan Studi Lapangan*.

**Pendekatan yang fleksibel dan modular:** PANGEA akan dilaksanakan dengan kombinasi akuisisi data darat, menara, dan drone selama beberapa tahun di lanskap tertentu dan kampanye musiman pengumpulan data intensif yang dapat mencakup komponen darat dan udara. Setiap bentang alam dan setiap kampanye dapat dilaksanakan dan didanai secara terpisah. PANGEA akan membutuhkan kampanye multitalahun di setiap lanskap untuk memungkinkan akuisisi data berbasis darat, udara, dan satelit yang tumpang tindih secara spasial. Namun, kami menekankan bahwa tidak akan ada persyaratan untuk kampanye di musim yang berbeda atau di benua yang berbeda untuk dilakukan pada tahun yang sama atau dalam urutan tertentu (misalnya, musim hujan sebelum musim kemarau). Jumlah benua dan lanskap di dalam benua dapat bervariasi sesuai dengan strategi yang diikuti (Baseline, Threshold, atau Descope). Kombinasi strategi dan waktu kampanye menghasilkan berbagai pilihan jadwal dan profil anggaran yang menawarkan fleksibilitas bagi manajemen NASA dan calon penyanggah dana kegiatan PANGEA.

**Tabel 2.** Deskripsi variabel ekologi dan geofisika yang relevan dengan proyek ini, dengan persyaratan pengamatan yang sesuai dan aset Observasi Bumi yang ada atau yang akan datang.

ARES: Fasilitas Penelitian Udara untuk Sistem Bumi. ET: evapotranspirasi. LST: suhu permukaan tanah. SIF: fluoresensi yang diinduksi oleh matahari. Teks **berwarna ungu** menunjukkan satelit dari badan-badan federal non-AS. \* Menunjukkan misi yang belum diluncurkan dan/atau mungkin masih dalam pertimbangan kompetitif. \*\* Menunjukkan misi yang baru saja berakhir. Lihat **Tabel -E1** di *Lampiran E* untuk *Tabel Pengukuran PANGEA yang terperinci*.

VARIABEL(-VARIABEL)	PERTANYAAN SAINS	PENGUKURAN TANAH	MENGAMATI TEKNOLOGI	ASET PENGAMATAN BUMI	
				SATELIT ( DIRENCANAKAN/DIUSULKAN)	UDARA ( DRONE/PESAWAT TERBANG)
<b>FLUKS EKOSISTEM</b> (GPP, ET, Respirasi Ekosistem)	Q1-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q20-Q24	Menara fluks, spektrum tingkat daun	Spektroskopi Inframerah, Termal	OCO-2/3, <b>TROPOMI</b> , GOES-R ABI, AHI, MTG-I, NASA GHG ESE*, <b>Sentinel 5P/5*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CO2M*</b> , GOSAT-2, GOSAT-GW*, Landsat, ECOSTRESS, SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>TRISHNA*</b> , <b>LSTM*</b> , VIIRS, <b>Sentinel-3</b> , <b>Komersial*</b> , satelit cuaca GEO	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
<b>PERTUKARAN ATMOSFER</b> (CO <sub>2</sub> & CH <sub>4</sub> Fluks, Kolom CO /CH <sub>24</sub> /CO)	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q20, Q21, Q24, Q27	Menara fluks, pengukuran ruang, TCCON, COCCON, Spektrometer EM27/SUN	Hiperspektral, Airborne Eddy Covariance (AEC), Spektroskopi Inframerah	EMIT, MethaneSat, SBG*, Carbon-i*, CarbonMapper*, OCO-2/3, NASA GHG ESE*, Sentinel 5P/5*, FLEX*, CO2M*, GOSAT-2, GOSAT-GW*	NASA AVIRIS-NG/3, CARAFE, CFIS (SIF), DLR CoMet (CO /CH <sub>24</sub> ), UZH ARES, NEON AOP, GAO
<b>BIOMASSA &amp; STRUKTUR DI ATAS PERMUKAAN TANAH</b> (Tinggi Kanopi, Heterogenitas Tinggi Vertikal, Dinamika Celah, Kematian Pohon)	Q1, Q2, Q4-Q13, Q15, Q17-Q21, Q23, Q25, Q28	Data plot inventarisasi hutan, pemindaian laser terestrial, data plot inventarisasi hutan sensus ulang	Lidar, Radar, Multispektral	GEDl, Icesat-2, MOLI*, EDGE*, Sentinel-1, NISAR*, BIOMASSA*, Landsat, Sentinel-1/2, Planet	NASA LVIS, UAVSAR, lidar jejak kaki kecil (pesawat), mengulang RGB drone atau Lidar
<b>KEANEKARAGAMAN</b> (Spektral, Fungsional, Ciri-ciri Daun Kanopi, Fauna, Fenologi)	Q2, Q4-Q7, Q10-Q15, Q20, Q24, Q25, Q28	Spektrum tingkat daun, keragaman taksonomi; sifat-sifat tanaman; IEK, TEK, LEK; perangkat kamera; sensor bioakustik; pergerakan hewan; eDNA; PhenoCams; pengamatan fenomenologi jangka panjang	Hiperspektral, Lidar, Radar, Radiometer Optik (OR)	EMIT, PACE, <b>PRISMA</b> , <b>EnMAP</b> , <b>Planet &amp; Planet Tanager</b> , SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>FLEX*</b> , NISAR*, <b>BIOMASS*</b> , Landsat, <b>Sentinel-2</b> , <b>OLCI</b>	NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, UZH ARES, GAO, lidar tapak kecil, RGB drone berulang

VARIABEL(-VARIABEL)	PERTANYAAN SAINS	PENGUKURAN TANAH	MENGAMATI TEKNOLOGI	ASET PENGAMATAN BUMI	
				SATELIT ( DIRENCANAKAN/DIUSULKAN)	UDARA ( DRONE/PESAWAT TERBANG)
<b>AMBANG BATAS KRITIS</b> (Tekanan Air, Tekanan Panas)	Q1-Q4, Q6-Q9, Q12-Q20, Q22, Q23, Q25	Probe kelembaban tanah, kadar air daun, potensi & konduktansi air daun/batang, VOD berbasis menara (L-band GNSS), kamera FLIR	Radar/radiometri gelombang mikro, GNSS-R/Sinyal Peluang, Hiperspektral	SMAP, <i>SMOS</i> , <i>Sentinel-1</i> , NISAR*, <i>BIOMASS*</i> , <i>LSTM*</i> , AMSR-E, EMIT, SBG VSWIR & TIR*, CHIME*, FLEX*, SNOOPI*, CYGNSS, Lemur-2, Landsat, ECOSTRESS, TRISHNA*, Komersial*	NASA UAVSAR, AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER, AirMOSS
<b>KEBAKARAN &amp; AEROSOL</b> (Api Aktif, Aerosol Pembakaran Biomassa)	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q21, Q26, Q28	Kelembaban bahan bakar hidup, kelembaban tanah, area terbakar, tingkat keparahan luka bakar, IEK, TEK, LEK, jenis bahan bakar, kepadatan bahan bakar, pengukuran aerosol	Termal, UV/Inframerah, Fotometer, Lidar	Landsat, VIIRS, <i>Sentinel-3</i> , SBG*, <i>TRISHNA*</i> , <i>LSTM*</i> , <i>Komersial*</i> , OMPS, EMIT, PACE, <i>OLCI</i> , NISAR*, <i>BIOMASSA*</i> , CALIPSO-CALIOP**, AOS*	NASA HyTES, MASTER
<b>TATA GUNA LAHAN &amp; TUTUPAN LAHAN &amp; JASA EKOSISTEM:</b> (Makanan, Air Tawar, Obat-obatan, Praktik Spiritual dan Upacara)	Q1, Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q14, Q16, Q19, Q21, Q23, Q28	Aktivitas pertanian, tingkat penebangan, praktik kebakaran, IEK, TEK, LEK, praktik manajemen konservasi, identifikasi budaya, kuantitas dan kualitas air	Radiometer Optik (OR), Hiperspektral, Lidar, Radar	Landsat, <i>Sentinel-1/2</i> , <i>Planet</i> , VIIRS, <i>OLCI</i> , EMIT, PACE, <i>PRISMA</i> , <i>EnMAP</i> , SWOT, SMAP, <i>SMOS</i> , GRACE-FO, SBG*, <i>CHIME*</i> , <i>FLEX*</i> , CarbonMapper*	NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, UZH ARES, GAO, lidar tapak kecil
<b>HIDRO-METEOROLOGI</b> (Air Permukaan, Air Tanah, Kelembaban Atmosfer, VPD, Angin)	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q22, Q23, Q25, Q28	Ketinggian permukaan air, luas genangan, karakterisasi debit, pengukuran sumur, stasiun cuaca	Altimeter, Radar, Radiometer, Gravimetri, Gelombang Mikro, Pengeras Suara Inframerah, Pencitra, Lidar angin Doppler	SWOT, <i>Sentinel-1</i> , NISAR*, <i>BIOMASS*</i> , GRACE-FO, ATMS, GeoXO*, AOS*, <i>Aeolus</i>	NASA UAVSAR, pengamatan radiosonde
<b>EDAPHIC</b> (Unsur Hara dan Tekstur Tanah, Topografi, Geomorfologi)	Q1, Q8, Q18, Q19, Q22-Q25, Q28	Sampel tanah	Hiperspektral, Lidar, Radar	EMIT, PACE, SBG*, <i>CHIME*</i> , SRTM, <i>Copernicus GLO-30</i>	NASA AVIRIS-NG/3, UAVSAR, LVIS, lidar tapak kecil
				<b>Catatan:</b> PANGEA akan mengeksplorasi hubungan korelasional dengan variabel yang diindera dari jarak jauh, bukan pengukuran langsung.	

## 6.2.2 Kandidat Lanskap

PANGEA akan berkolaborasi erat dengan lembaga-lembaga mitra di dalam negeri untuk memastikan kelancaran pelaksanaan kegiatan lapangan dan udara di lanskap-lanskap terpilih yang berjarak kurang lebih 10.000 km.<sup>2</sup>. **Desain pengambilan sampel bersarang PANGEA mendukung pendekatan pengambilan sampel sesuai skala (Gambar 18)**. Pengukuran di lapangan akan menjangkau gradien di dalam lanskap, dan lanskap akan menjangkau gradien iklim dan keanekaragaman hayati di dalam benua (**Gambar 11**). PANGEA akan memprioritaskan negara-negara yang memiliki bentang alam dengan pertemuan antara ekosistem hutan, lahan gambut, dan lahan basah yang masih utuh, terganggu, dan terdegradasi, serta agroekosistem yang berdekatan. Pengumpulan data lapangan yang terkoordinasi akan menjangkau gradien ini di setiap lanskap. **Tabel 3** merangkum kandidat lanskap berdasarkan informasi yang diberikan oleh para mitra. Lanskap PANGEA akan memprioritaskan lokasi-lokasi di mana data yang dijelaskan di awal *Bagian 6.2.4* telah dikumpulkan atau di mana pengumpulan data dapat diperluas di bawah PANGEA.

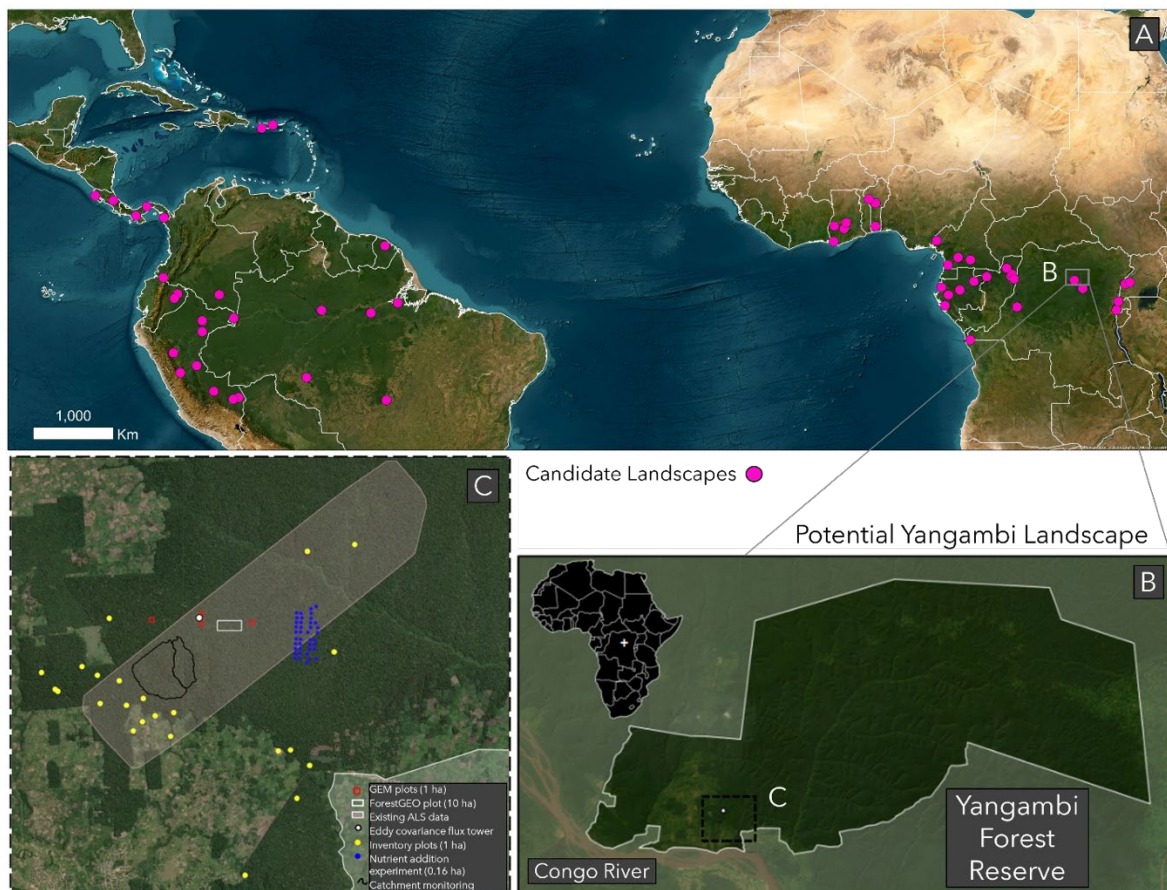
**Tabel 3.** Kandidat lanskap PANGEA. Lingkaran berwarna menunjukkan data yang tersedia, berdasarkan jenisnya. ● = Data darat; ● = Data sosial ekonomi; ● = Data menara; ● = Data drone; ● = Data pesawat.

● = Data pesawat NASA. \* Menunjukkan kegiatan yang direncanakan. ATTO: Observatorium Menara Tinggi Amazon. Lanskap yang dicetak **tebal** adalah situs GEO-TREES yang telah dikonfirmasi. Lanskap yang *dicetak miring* adalah lokasi inisiatif One Forest Vision yang telah dikonfirmasi.

LANSKAP	NEGARA	DATA YANG TERSEDIA
<b>LANSKAP HUTAN TROPIS AMERIKA YANG POTENSIAL</b>		
KM34/ATTO (Manaus)	Brasil	● ● ● ● ●
KM67 (Santarem)		● ● ● ●
Rebio Jaru		● ●
Tanguro		● ● ● ●
Caxiua		● ●
<b>Amacayacu</b>	Kolombia	●
Amazonas		●
La Planada		● ●
Santa Rosa		● ● ● ● ● ●
Turrialba	Kosta Rika	● ● ● ●
Tiputini	Ekuador	● ●
Yasuní		● ●
<b>Paracou</b>	Guyana Prancis	● ● ● ● ●
Agua Salud	Panama	●
<b>BCI</b>		●
Darien	Peru	● ●
Iquitos		●
Huánuco		● ●
<b>Jenaro Herrera</b>		● ●
Los Amigos		● ●
Madre de Dios		●
San Martin		● ●
<b>Tambopata</b>		● ●
Ucayali		●
Guanica	Puerto Rico	● ● ● ●
Luquillo		● ●

LANSKAP	NEGARA	DATA YANG TERSEDIA
<b>LANSKAP HUTAN TROPIS AFRIKA YANG POTENSIAL</b>		
Nalohou	Benin	● ●
Bellefoungou		● ●
La Lama		● ●
<b>Dja</b>	Kamerun	● ● ● ● ● ●
<b>Mbalmayo</b>		● ● ● ●
Korup		●
Campo Ma'an		●
<i>Luki</i>	Dem. Republik Kongo	● ● ● ● ● ●
Mai Ndombe		● ● ● ● ● ●
<b>Yangambi</b>		● ● ● ●
Cagar Alam Yoko		● ● ●
Ankasa	Ghana	● ●
Bia Tano		● ●
Bobiri		● ●
Kogyae		● ●
<b>Lopé</b>	Gabon	● ●
<b>Ipasa</b>		●
Mondah		● ●
Mabounié		● ●
Rabi.		● ●
Bokatola	Republik Kongo	●
Kolongomba		●
Lac Tele		●
<b>Loundoungou</b>		● ● ● ●
Odzala-Kokoua	Rwanda	● ● ● ●
Nyungwe		●
Gunung berapi		●
<b>Kibale</b>		●
<i>Sebitoli</i>	Uganda	●

PANGEA akan mengkoordinasikan pemilihan lanskap secara erat dengan upaya-upaya yang secara aktif sedang dalam proses pemilihan lokasi untuk pengumpulan data pelengkap dan investasi infrastruktur. Upaya-upaya tersebut termasuk GEO-TREES, kampanye INPE-ESA Amazon, Inisiatif One Forest Vision, Moore Foundation dan National Science Foundation (NSF) yang mendanai pengukuran lapangan metana dan lahan gambut tropis, serta berbagai proposal Schmidt Science Virtual Institute for the Carbon Cycle yang berfokus pada daerah tropis. Proses pemilihan lanskap dan lokasi akan diformalkan dalam Rencana Percobaan Ringkas untuk memastikan pemilihan dan persetujuan lanskap dan lokasi di dalam lanskap secara transparan untuk pengumpulan data dari darat dan udara. Proses ini akan dibangun berdasarkan diskusi yang sedang berlangsung dengan mitra lembaga lokal dan manajer lokasi yang dimulai selama proses pelingkupan dan akan mencakup desain bersama dengan Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal (lihat *Bagian 8* untuk informasi lebih lanjut).



**Gambar 18.** Kandidat lanskap potensial membentang di wilayah tropis Amerika dan Afrika (A). Yangambi, salah satu contoh kandidat lanskap potensial, diilustrasikan pada panel B, yang memiliki plot inventarisasi yang ada, menara fluks, dan data pesawat terbang (C) yang dapat berada di dalam lanskap PANGEA yang lebih besar yang mencakup ekosistem pertanian, ekosistem yang masih utuh, dan ekosistem yang telah terdegradasi.

### 6.2.3 Pengamatan Penginderaan Jauh Satelit

Ada banyak platform satelit NASA yang akan berkontribusi pada tujuan sains dan aplikasi PANGEA, serta ekosistem sensor yang terus meningkat dari badan antariksa dan lembaga swadaya masyarakat (LSM) lainnya (**Tabel 2 & E-1**). PANGEA siap untuk memanfaatkan misi Earth Observing System (EOS) untuk

memahami pola sifat-sifat ekosistem tropis dan perubahannya di masa lalu, serta untuk memajukan cara kita menggunakan sensor ruang angkasa di era misi Earth System Observatory (ESO). PANGEA juga siap untuk berkontribusi pada peningkatan dan penyempurnaan algoritma ESO agar dapat merepresentasikan ekosistem tropis dengan lebih baik dan memenuhi kebutuhan pengguna di wilayah-wilayah yang penting secara global ini. Pekerjaan in situ yang dilakukan oleh PANGEA yang dipasangkan dengan pengamatan penginderaan jarak jauh satelit akan memungkinkan bioma hutan tropis dan masyarakat yang tinggal di wilayah ini untuk menjadi bagian dari siklus kebaikan Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi, memastikan inklusi mereka dalam proses tersebut.

**Tabel 4.** Contoh pengamatan dan kemajuan penginderaan jauh satelit.

Teks **berwarna ungu** menunjukkan satelit dari lembaga federal non-AS. \* Menunjukkan misi yang belum diluncurkan dan/atau mungkin masih dalam pertimbangan kompetitif.

PENGAMATAN SATELIT	KALIBRASI, VALIDASI, DAN KEMAJUAN ALGORITMA DARI PANGEA
Sentinel-1, NISAR*, BIOMASSA*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Memperluas kalibrasi/validasi pemetaan biomassa di sepanjang gradien gangguan dan iklim.</li> <li>Mendukung pengembangan produk data dari NISAR dan BIOMASS di hutan lebat.</li> </ul>
MEMANCARKAN, BERPADU*, SBG-VSWIR*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Memperluas data validasi untuk produk turunan EMIT di hutan tropis.</li> <li>Dukungan untuk produk vegetasi L3 yang lebih baik dari SBG VSWIR.</li> </ul>
OCO-2/3, TROPOMI, MethaneSat, EMIT, CarbonMapper	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dapatkan sampel kalibrasi XCO<sub>2</sub> dan XCH<sub>4</sub> yang bebas dari awan di wilayah tropis.</li> <li>Data pendukung untuk produk L3, penskalaan antara mode target dan data cakupan spasial yang luas.</li> </ul>
Karbon-I *	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data validasi fluks gas rumah kaca dari lahan basah.</li> </ul>
GEDI, ICESat-2, EDGE*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data struktur hutan dengan akurasi tinggi untuk produk L3 spaceborne lidar yang lebih baik.</li> <li>Peluang untuk data kalibrasi untuk produk kuantifikasi biomassa L4.</li> </ul>
SMAP, SMOS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data kalibrasi untuk produk kelembaban tanah di hutan lebat.</li> </ul>
Geostasioner: GOES-R ABI (Amerika), MTG-I (Afrika) & AHI (Asia)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data kalibrasi untuk estimasi fungsi ekosistem pada skala waktu sub-harian.</li> </ul>
VIIRS, Sentinel-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mendukung pengembangan produk L3 dari dinamika kebakaran.</li> <li>Data kalibrasi untuk mendeteksi kebakaran skala kecil.</li> </ul>
ECOSTRESS, SBG-TIR, FLEX*	<ul style="list-style-type: none"> <li>Data pendukung untuk memperoleh estimasi fungsi ekosistem L3 dan L4 di segala cuaca.</li> <li>Data kalibrasi untuk hubungan yang muncul antara struktur dan komposisi hutan dan fungsi ekosistem.</li> </ul>

Pada **Tabel 4**, kami menyortir berbagai sensor ruang angkasa NASA yang telah beroperasi dan yang akan datang, kebutuhan mereka akan kemajuan di daerah tropis yang dapat diatasi oleh PANGEA, dan ilmu pengetahuan yang dapat dikembangkan oleh tim PANGEA dengan menggunakan sensor-sensor ini bersamaan dengan kegiatan PANGEA yang direncanakan. Tabel ini juga mencakup beberapa sensor yang dioperasikan oleh badan antariksa non-NASA yang datanya tersedia secara terbuka. PANGEA juga akan mengeksplorasi kumpulan data komersial yang tersedia melalui program Akuisisi Data SmallSat Komersial (CSDA) NASA selama fase Definisi Sains dan Implementasi proyek.

## 6.2.4 Pengamatan Penginderaan Jauh dari Udara

Pengamatan udara PANGEA, termasuk pesawat berinsumen dan pesawat tanpa awak, akan dirancang bersama dengan mitra lokal. Semua permintaan izin negara dan izin penerbangan akan dikoordinasikan oleh program udara NASA dan JPL yang bekerja sama dengan Kantor Hubungan Internasional dan Antarlembaga (OIIR) NASA dan Departemen Luar Negeri AS (lihat **Kotak 2**). Ketika menggunakan pesawat yang dikontrak NASA atau NASA, semua proses kelaikan udara yang sesuai serta persetujuan dan pelepasan penerbangan akan dikoordinasikan di tingkat proyek PANGEA dengan pusat-pusat yang sesuai, markas besar NASA, dan JPL. Sensor dan pesawat yang tepat akan ditentukan selama pengembangan Rencana Eksperimen Ringkas.

PANGEA memanfaatkan dan membangun sejarah kampanye udara internasional NASA yang sukses, termasuk banyak kampanye di Afrika. Baru-baru ini, NASA melaksanakan kampanye AfriSAR 2016 dan AfriSAR-2 2023/2024, di mana AfriSAR-2 memperluas cakupan awal dan keberhasilan AfriSAR di Gabon untuk mengumpulkan data di Kamerun, Republik Demokratik Kongo (RDK), Ghana, Republik Kongo, dan Sao Tome dan Principe. Pada tahun 2023, kampanye BioSCape menerbangkan dua pesawat NASA yang terintegrasi dengan empat instrumen penginderaan jarak jauh dari udara, memperoleh pengamatan kontemporer dari UV melalui VSWIR dan rentang termal serta data lidar gelombang penuh. Kombinasi instrumen ini disertai dengan kampanye pengamatan lapangan yang ekstensif, yang dilaksanakan oleh Tim Sains yang beragam dengan ~50% partisipasi lokal. Keberhasilan AfriSAR dan BioSCape serta pengembangan kapasitas yang berkelanjutan telah menjadi

### **Kotak 2. Perjanjian Internasional dan Perjanjian Lainnya**

Mitra internasional PANGEA akan dilibatkan sejak awal dan secara terus menerus untuk memastikan hubungan yang kuat yang akan mendukung keberhasilan kampanye di lapangan dan di udara. Untuk setiap lanskap PANGEA, perjanjian dan/atau izin formal akan diperoleh dari pemerintah terkait dan pemimpin masyarakat adat. Segera setelah PANGEA terpilih, Tim Sains PANGEA akan mulai melibatkan mitra institusional untuk mendukung pengembangan diskusi formal mengenai perjanjian diplomatik yang diperlukan yang akan diperlukan untuk melakukan penelitian lapangan dan mengerahkan pesawat untuk mendukung kampanye TE NASA. Ketika jalur dengan masing-masing pemerintah asing telah ditetapkan, Tim Sains PANGEA akan bekerja sama dengan NASA SMD melalui Manajer Program TE untuk mengembangkan pengaturan diplomatik yang tepat untuk melakukan penelitian lapangan dan kampanye udara di setiap negara. Perjanjian diplomatik (seperti nota kesepahaman [MOU], perjanjian pelaksanaan [IA], dan/atau izin terbang) perlu dibuat antara Pemerintah AS dan Negara Asing sedini mungkin. Ketika dokumen-dokumen tersebut diperlukan antara NASA dan Pemerintah Asing, Tim Sains PANGEA dan Manajer Program TE, bekerja sama dengan OIIR NASA, SMD, Pusat-pusat NASA termasuk JPL, Kantor Pendukung CCE, dan Departemen Luar Negeri AS, akan bekerja melalui jalur diplomatik dan protokol yang tepat untuk membuat dokumen-dokumen yang diperlukan untuk kampanye lapangan dan udara yang sukses. Tim Sains PANGEA juga akan berkonsultasi dengan NASA, Departemen Luar Negeri AS, Dinas Kehutanan AS (USFS), dan Badan Pembangunan Internasional AS (USAID) untuk mengidentifikasi dan mengupayakan sinergi antara kegiatan PANGEA dengan tujuan diplomatik AS, termasuk kerja sama ilmiah dan hubungan antarnegara. Tim Ilmu Pengetahuan PANGEA, Program TE, dan Kantor Pendukung CCE akan bekerja sama untuk menjamin bahwa tanah adat dan wilayah kedaulatan merupakan mitra dalam proses persetujuan diplomatik. Pengalaman Tim Ilmuwan PANGEA saat ini dalam berbagai kampanye lapangan dan udara internasional akan memfasilitasi pembuatan perjanjian internasional yang tepat untuk proyek PANGEA.

contoh yang sangat baik dalam diplomasi sains dan secara positif mempengaruhi persepsi publik terhadap NASA dan Amerika Serikat di Afrika.

Sejumlah Earth Venture Suborbital (EVS) dan kampanye udara internasional NASA lainnya juga telah menunjukkan kelayakan pesawat NASA dan pesawat yang dikontrak NASA yang dikerahkan secara internasional dengan instrumen penginderaan in situ dan penginderaan jarak jauh untuk mendukung kampanye berskala besar selama beberapa tahun di daerah tropis Amerika. Pada tahun 2023, NASA JPL memiliki kampanye yang sukses dengan AVIRIS-NG yang mengumpulkan data penginderaan jauh dengan pesawat yang dikontrak NASA di atas Chili, Kolombia, dan Ekuador untuk pengamatan sumber titik metana dengan berkoordinasi dengan masing-masing negara. Hal ini merupakan kelanjutan dari kampanye sukses sebelumnya di wilayah tersebut, termasuk, misalnya, penerbangan UAVSAR di Kolombia, Ekuador, Peru, dan Guyana Prancis; penerbangan AVIRIS di Kolombia, Ekuador, dan Chili; dengan penerbangan AVIRIS yang direncanakan di Panama dan Kosta Rika; dan penerbangan LVIS di Guyana Prancis. Semua kampanye ini mewakili pengalaman puluhan tahun dari kantor pusat NASA dan pusat-pusatnya (termasuk JPL) yang bekerja sama dengan universitas dan kolaborator internasional untuk memperoleh data penginderaan jauh dari udara dan data in situ selama kampanye lapangan global.

**Saat PANGEA mengembangkan Rencana Eksperimen Ringkas, PANGEA akan terus memanfaatkan pengalaman anggota tim dari kampanye internasional sebelumnya.**

Yang penting, pengumpulan data udara PANGEA tidak harus menggunakan aset NASA atau pesawat NASA. Pembelian data komersial dan penerbangan dengan pesawat asing dan komersial juga merupakan opsi yang layak untuk akuisisi udara PANGEA. Sensor NASA dapat diterbangkan dengan pesawat komersial. Sebagai contoh, sensor AVIRIS sering diterbangkan baik di dalam maupun luar negeri dengan pesawat Dynamic Aviation. Misi EVS Oceans Melting Greenland (OMG), Delta-X, dan Coral Reef Airborne Laboratory (CORAL) semuanya berhasil mengerahkan pesawat yang dikontrak NASA JPL dengan instrumen dan anggota tim JPL. Pembelian data komersial juga akan sangat memperluas kemampuan udara. Sebagai contoh, transek lidar komersial yang didanai AS yang diperoleh dengan dukungan USAID melalui Lanskap Berkelanjutan Brasil menjangkau wilayah yang luas di Brasil (dos Santos et al., 2019), dan upaya serupa memungkinkan pengambilan sampel di hutan di Republik Demokratik Kongo (Xu et al., 2017), yang menunjukkan kelayakan di wilayah geografis PANGEA yang penting. Fasilitas Penelitian Udara untuk Sistem Bumi (ARES) dari Universitas Zurich, merupakan mitra penting lainnya yang mendukung akuisisi udara PANGEA. ARES telah berhasil memperoleh data untuk kampanye kolaboratif NASA dan ESA. Sensor yang ada di dalam pesawat ARES meliputi spektrometer pencitraan AVIRIS-4, lidar gelombang penuh, dan kamera fotogrametri berkinerja tinggi.

Terdapat keselarasan yang kuat dengan dan minat dari mitra akuisisi data dari udara dari badan antariksa (misalnya, ESA, ISRO, JAXA). Sebagai contoh, serangkaian kampanye Amazon 2025/26 yang dikoordinasikan antara Institut Nasional Brasil untuk Penelitian Antariksa (INPE) dan Badan Antariksa Eropa (ESA) berencana untuk mengumpulkan data fluoresensi, metana, dan data in-situ dari udara, serta kemungkinan data fluks karbon dan data spesies, termasuk CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> yang diambil dengan menggunakan sensor HELIPOD yang dibawa dengan menggunakan helikopter. Pusat Kedirgantaraan Jerman (DLR) merencanakan kampanye terkoordinasi di Brasil pada tahun 2026 dengan tujuan untuk menyebarkan lidar metana (CHARM- F) dan sistem pencitraan untuk mendeteksi metana. Badan

Antariksa Prancis (CNES) juga terlibat, dengan fokus yang sama pada metana, menggunakan pengumpulan data dari udara dan darat. ESA juga merencanakan kegiatan kampanye udara di atas Afrika yang berfokus pada validasi pengamatan gas rumah kaca satelit. Rencana ESA sedang berlangsung dan akan dijelaskan lebih lanjut setelah lokakarya yang dipimpin oleh ESA pada musim semi 2025. Banyak anggota tim PANGEA saat ini yang bekerja sama dengan tim INPE, ESA, DLR, dan CNES. PANGEA mendapatkan banyak manfaat dari dan berkontribusi pada jenis kolaborasi internasional ini.

PANGEA juga akan memanfaatkan kemampuan drone untuk melengkapi pengumpulan data pesawat dan melakukan akuisisi data yang membutuhkan frekuensi temporal yang lebih tinggi (misalnya, kematian pohon, fenologi). PANGEA akan menggunakan instrumen Technology Readiness Level (TRL) 9 lidar dan RGB UAV. Penawaran hiperspektral berbasis UAV komersial saat ini sering kali menimbulkan tantangan dan cenderung hanya mencakup kisaran VNIR, kehilangan bagian gelombang pendek dari spektrum yang penting untuk pengukuran ekosistem yang relevan. Tim PANGEA akan terus melacak ketersediaan dan kegunaan teknologi ini dan akan membangun protokol untuk menggunakan teknologi ini sebagaimana mestinya untuk mendukung kegiatan sains.

Beberapa akuisisi data PANGEA akan membutuhkan pengukuran lapangan dan pengamatan udara yang hampir bersamaan yang dimungkinkan oleh perencanaan awal kampanye lapangan; metode komunikasi yang jelas dan dapat diandalkan antara tim penerbangan dan lapangan; dan rencana yang menggabungkan fleksibilitas waktu. Dalam persiapan dan selama kampanye, PANGEA akan mengandalkan pengamatan cepat dan alat pelacakan penerbangan yang hampir seketika, seperti yang digunakan dalam BioSCape (Cardoso et al., 2024), untuk mengoptimalkan pengumpulan data dari udara, memfasilitasi pencocokan di lapangan yang lebih baik, dan meningkatkan transparansi.

**PANGEA juga mendukung kolaborasi internasional yang inklusif.** Belajar dari keberhasilan BioSCape dalam hal ini, PANGEA akan menerapkan skema penentuan prioritas yang transparan untuk wilayah-wilayah yang diminati oleh Tim Ilmuwan dan akan meminta umpan balik mengenai skema penentuan prioritas sebelum kampanye udara melalui balai kota, lokakarya, pertemuan bilateral, dan survei. PANGEA akan membagikan rencana penerbangan awal dan mengimplementasikan proses berulang sehingga Tim Sains dan mitra lokal dapat berkontribusi dalam menyempurnakan desain akuisisi data, sambil menjelaskan kepada Tim Sains dan mitra lokal bahwa tidak ada data dari udara yang dijamin, dan semua akuisisi yang diusulkan bersifat sementara hingga berhasil dieksekusi. Informasi tentang aktivitas penerbangan harian, termasuk panggilan pergi/tidak pergi, akan segera disampaikan setelah keputusan harian dibuat.

## 6.2.5 Observasi dan Studi Lapangan

Pengukuran di lapangan diperlukan untuk (1) memvalidasi pengamatan sifat-sifat ekosistem di luar angkasa baik dari program NASA yang sudah tercatat maupun misi-misi yang baru diluncurkan; (2) mengungkap pendorong mekanistik dari fluks dan pola yang diamati, yang kemudian dapat menjadi dasar pengembangan model dan interpretasi pengamatan di luar angkasa; dan (3) mengevaluasi ketergantungan skala dari proses-proses ekologis. Terlepas dari pentingnya ekosistem tropis, ekosistem ini sangat kurang terwakili dalam hal pengukuran lapangan, yang dapat menyebabkan representasi yang buruk dalam produk data tingkat yang lebih tinggi dari misi satelit (lihat **Tabel 3**), yang menggarisbawahi pentingnya pengukuran dan studi berbasis lapangan PANGEA. Produk data lapangan secara garis besar meliputi hal-hal berikut:

- **Data dan pengetahuan in-situ manual** mencakup semua data yang harus diukur dan/atau dikumpulkan secara langsung oleh individu di lapangan dan tidak dapat diotomatisasi dengan mudah. Contohnya adalah plot inventarisasi hutan, ciri-ciri daun dan kayu, pemindaian laser terestrial, pengukuran fluks ruang, identifikasi spesies, eDNA, data pergerakan hewan, pengukuran jenis tanaman dan hasil panen, dan pengetahuan ekologi adat, tradisional, dan lokal (IEK, TEK, dan LEK). Data dan basis pengetahuan ini penting untuk memahami hubungan mekanistik antara pola dan proses serta untuk validasi data drone, pesawat, dan satelit.
- **Data in situ yang terotomatisasi** mencakup semua pengukuran di lapangan yang mendukung validasi dan pemahaman proses ekologi, namun tidak memerlukan kunjungan lapangan yang sering dan lebih mudah diotomatisasi. Contohnya adalah pengukuran dendrometer, fluks getah, dan kelembaban tanah, serta data kamera jebakan dan bioakustik. Serupa dengan pengambilan sampel biologis, pengukuran ini penting untuk mengembangkan dan memahami proses dan memvalidasi pengamatan jarak jauh.
- **Data fluks dan meteorologi** mencakup semua data yang dikumpulkan di menara fluks atau stasiun cuaca, termasuk fluks karbon, air, dan energi, suhu udara, suhu tanah, kandungan air volumetrik tanah, kelembaban relatif, dan curah hujan. Teknik eddy-covariance menggunakan menara perancah di atas kanopi hutan dan mengukur angin frekuensi tinggi dan data skalar (konsentrasi gas, energi, momentum) untuk memperkirakan fluks air dan karbon ekosistem-di mana karbon mengacu pada  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , dan fluks lateral.
- **Penginderaan jarak jauh proksimal berbasis menara** mencakup semua data yang dapat dikumpulkan dari platform yang dipasang di menara. Pengukuran ini akan melengkapi pengambilan data penginderaan jarak jauh dengan drone dan pesawat terbang untuk menghubungkan secara lebih langsung ciri-ciri dan fluks ekosistem dengan pengamatan satelit. Pengukuran penginderaan jauh proksimal berbasis menara PANGEA meliputi reflektansi hiperspektral, fluoresensi yang diinduksi oleh matahari (SIF), radiasi inframerah termal (TIR), hamburan gelombang mikro, lidar, VOD (L-band GNSS), dan PhenoCams.
- **Penginderaan jarak jauh proksimal berbasis drone** meliputi lidar, gambar RGB untuk struktur dan spektrum, data multispektral, dan potensi pengembangan sensor hiperspektral berbasis drone. Terdapat tiga aspek kunci dalam pemantauan berbasis drone: (1) memungkinkan pengumpulan data frekuensi tinggi dan pemantauan tren temporal secara terus menerus dengan cara yang tidak dapat dilakukan oleh pesawat terbang; (2) memberikan kemampuan untuk menangkap tren bahkan pada saat kondisi mendung, yang umum terjadi di kawasan hutan tropis; dan (3) dapat melengkapi pengukuran berbasis lapangan yang mungkin tidak dapat menjangkau bagian atas tajuk karena tertutup oleh hutan dan sistem wanatani. Ketika dipasangkan dengan validasi di lapangan, akuisisi berbasis drone sangat penting untuk mengukur fenomena seperti kematian pohon, fluks karbon, fenologi, dan perubahan sifat-sifat fungsional dengan variasi musiman.

Beberapa faktor dapat membatasi atau menghambat pengukuran lapangan di hutan tropis. Pertama, akses ke medan yang padat dan sulit dilalui serta daerah terpencil dapat membatasi kemampuan untuk menggunakan dan memelihara peralatan lapangan di beberapa lokasi. Demikian juga, cuaca ekstrem, seperti hujan lebat selama musim hujan dan panas serta kelembapan yang ekstrem, menciptakan lingkungan kerja yang keras, yang dapat membatasi durasi dan cakupan kerja lapangan. Selain itu, banyak hutan tropis berada di wilayah yang mengalami ketidakstabilan politik, konflik, atau sengketa tata guna lahan, yang dapat menimbulkan risiko bagi para peneliti dan menyulitkan pelaksanaan penelitian jangka panjang. Selain itu, pendanaan dan sumber daya untuk ilmu

pengetahuan sebagian besar berasal dari belahan bumi utara, sehingga membatasi sumber daya untuk mendanai penelitian lapangan secara langsung di daerah tropis. Keterbatasan ini secara historis mengakibatkan pelaksanaan kampanye pengukuran intensif hanya dilakukan di beberapa lokasi di hutan tropis. Pengukuran di daerah tropis tidak dapat digeneralisasi dengan mudah karena ekosistem tropis memiliki keanekaragaman hayati yang tinggi, dan data yang ada mungkin hanya mewakili kondisi lokal.

PANGEA akan mengatasi keterbatasan ini dengan membangun kemitraan kolaboratif yang langgeng dan saling menguntungkan dengan organisasi-organisasi tropis setempat untuk meningkatkan, memperkuat, dan mengisi kesenjangan infrastruktur dan upaya-upaya yang sudah ada (**Tabel 5**). Para mitra telah dilibatkan dalam proses pelingkupan dan akan dilibatkan di seluruh PANGEA, termasuk dalam pengembangan Rencana Percobaan Ringkas PANGEA. Lihat *Bagian 8, Strategi Pelibatan Masyarakat*, untuk informasi lebih lanjut. PANGEA berencana untuk membangun hubungan dengan semua mitra ini untuk mencapai Tujuan Sains proyek. Kami mencatat secara khusus bahwa lokasi fluks, seperti yang ada di jaringan menara fluks kovarian eddy global (FLUXNET), biasanya memiliki infrastruktur dan catu daya yang cukup untuk menyelenggarakan pengukuran dukungan tambahan seperti penginderaan jarak jauh proksimal. Oleh karena itu, PANGEA akan memprioritaskan pengukuran lapangan yang bermitra dengan situs FLUXNET untuk memanfaatkan infrastruktur yang ada dan membangun kolaborasi. Kami juga mencatat bahwa NGEE-Tropis akan mulai terbenam pada saat PANGEA memasuki fase paling aktif. PANGEA akan membangun secara langsung upaya pengumpulan data NGEE-Tropis dengan memperluas pengukuran serupa ke Afrika dan mengumpulkan data penginderaan jauh yang terkolokasi, di samping membangun upaya pemodelan NGEE-Tropis (lihat *Bagian 6.3*).

**Tabel 5.** Organisasi mitra dengan penelitian berbasis lapangan yang sedang berlangsung dan kegiatan yang sinergis dengan PANGAEA.

AMMA-CATCH: Analisis Multidisiplin Monsun Afrika Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique. AndesFlux: Menara fluks yang dioperasikan oleh PUCP. ForestGEO: Forest Global Earth Observatory (Observatorium Bumi Global Hutan). GEM: Jaringan Pemantauan Ekosistem Global. PUCP: Universitas Katolik Kepausan Peru. RAINFOR: Jaringan Inventarisasi Hutan Amazon.

ORGANISASI	KONTRIBUSI POTENSIAL
Aliansi untuk Ilmu Pengetahuan Hutan Tropis (ATFS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 11 jaringan penelitian (misalnya, AfriTRON, ForestGEO, GEM, RAINFOR).</li> <li>• 11.656 plot inventarisasi hutan di 56 negara.</li> <li>• Kepemimpinan yang kuat dalam pengembangan kapasitas.</li> </ul>
Observatorium Menara Tinggi Amazon (ATTO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proyek bersama Jerman-Brasil.</li> <li>• Tiga menara fluks (termasuk menara setinggi 325 meter).</li> <li>• Data tambahan (siklus biogeofisika/biogeokimia dan cuaca).</li> </ul>
AndesFlux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 6 menara fluks eddy dan plot permanen di Amazon bagian barat.</li> <li>• Lokasi yang mencakup gradien panjang musim kemarau (0-6 bulan).</li> </ul>
Congo Basin Institute (CBI)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 stasiun lapangan biologi di Kamerun.</li> <li>• Jaringan organisasi di seluruh Lembah Kongo.</li> <li>• Sekolah CBI untuk Pengetahuan Adat dan Lokal (SILK).</li> </ul>
Prakarsa Ilmu Pengetahuan Cekungan Kongo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Platform yang dipimpin oleh para ilmuwan untuk investasi ilmiah jangka panjang.</li> <li>• Upaya membangun kapasitas ilmiah lokal.</li> <li>• Inisiatif pembangunan berkelanjutan.</li> </ul>
CongoFlux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stasiun penelitian tropis di Yangambi (Republik Demokratik Kongo).</li> <li>• Fluks kovarians eddy (<math>\text{CO}_2</math>, <math>\text{N}_2\text{O}</math>, <math>\text{CH}_4</math>, <math>\text{H}_2\text{O}</math>, panas yang masuk akal).</li> <li>• Data tambahan untuk mengkarakterisasi siklus karbon.</li> </ul>
FLUXNET	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jaringan jaringan internasional (misalnya, jaringan menara eddy-covariance Flux di Amerika [AmeriFlux], Sistem Pengamatan Karbon Terpadu [ICOS]).</li> <li>• Data fluks kovarians eddy yang terkonsolidasi dan terstandarisasi.</li> </ul>
GEO-TREES	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jaringan jaringan (misalnya, AfriTRON, ForestGEO, GEM, RAINFOR).</li> <li>• Plot inventarisasi hutan yang terkoordinasi dan penginderaan jarak jauh dari udara.</li> <li>• Data untuk mengkalibrasi estimasi stok karbon dari luar angkasa.</li> </ul>
Aliansi Global Komunitas Teritorial (GATC)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Jaringan Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal.</li> <li>• Mewakili 35 juta orang di 24 negara (Afrika, Amerika, Asia).</li> <li>• Pengembangan kapasitas untuk pengelolaan berkelanjutan dan perlindungan budaya.</li> </ul>
Guyafor dan Guyaflux	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guyafor: Jaringan 54 plot jangka panjang di 17 lokasi di Guyana Prancis.</li> <li>• Guyaflux: Menara kovariasi eddy jangka panjang (21 tahun) di Guyana Prancis.</li> </ul>
LBA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Program Permanen Pemerintah Brasil.</li> <li>• Platform untuk infrastruktur dan dukungan kolaborasi penelitian di Amazon.</li> </ul>
NGEE-Tropis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Proyek multi-lembaga yang berlangsung selama beberapa dekade oleh Departemen Energi AS (DOE).</li> <li>• Lokasi intensif di Australia, Brasil, Malaysia, Panama, dan Puerto Rico.</li> <li>• Pengumpulan data bertujuan untuk meningkatkan pemodelan hutan yang beragam.</li> </ul>
Jaringan Fluks Afrika Barat	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3 menara fluks eddy: 2 hutan (Bellefoungou dan La Lama), 1 tanaman campuran (Nalohou)</li> <li>• Bellefoungou dan Nalohou: Pengukuran kovarians eddy dan cuaca jangka panjang (16 tahun), air permukaan (jaringan AMMA-CATCH), dan sampel tanah yang menjangkau topografi dan gradien geomorfologi.</li> <li>• La Lama: Survei spesies tersedia di GBIF</li> </ul>

## 6.3 Pemodelan, Sintesis Data, dan Analisis Integratif

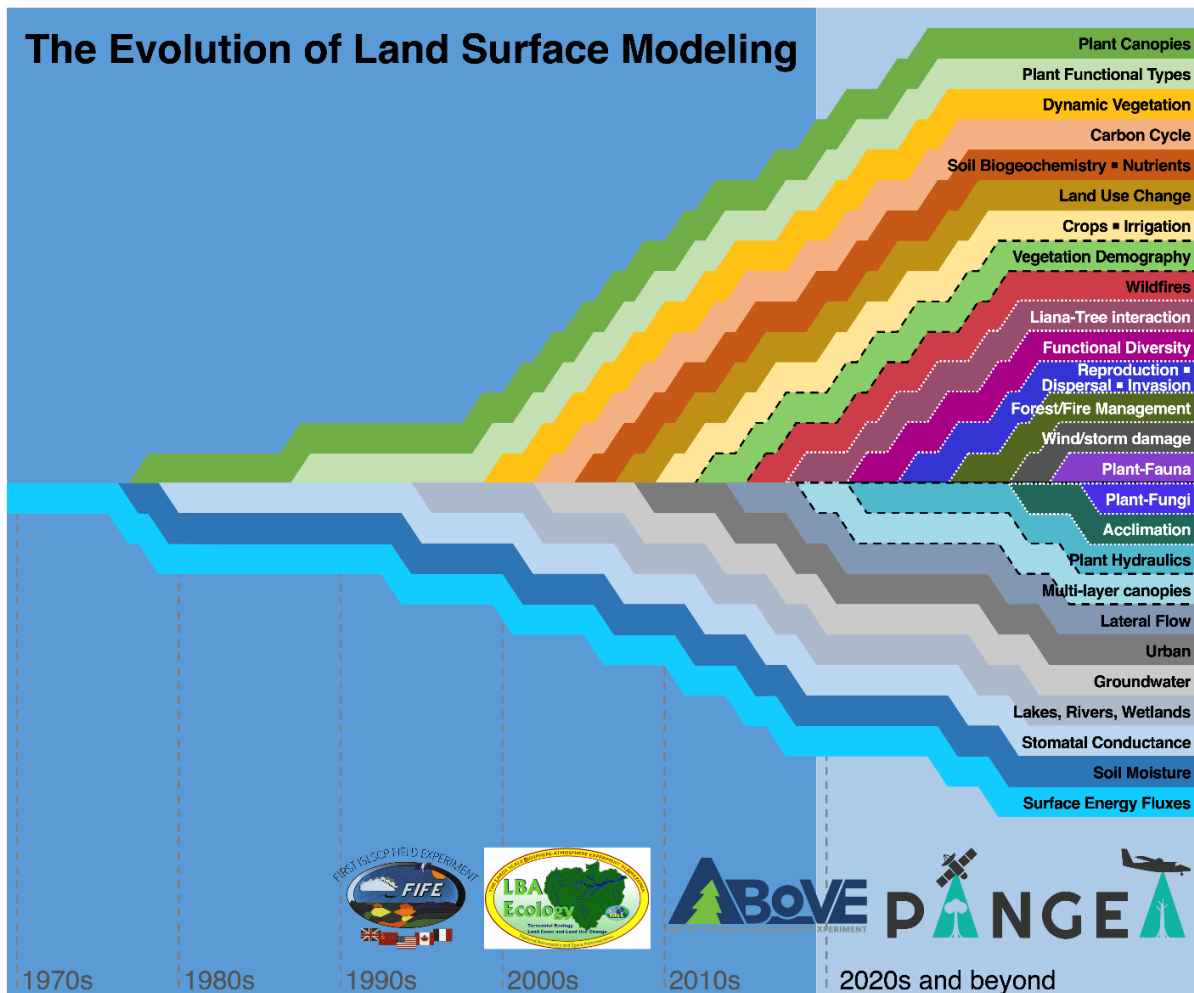
### 6.3.1 Pendekatan Pemodelan dan Integrasi Data

Pemodelan dan sintesis data merupakan komponen fundamental dari PANGEA. Kegiatan pemodelan dan sintesis data akan melintasi semua Tema Ilmu Pengetahuan (*Bagian 2*) dan berperan penting dalam menjawab pertanyaan-pertanyaan ilmiah utama PANGEA (*Bagian 3*). Selama proyek berlangsung, PANGEA akan memprioritaskan dataset dari darat dan udara yang dapat disintesis di berbagai skala dan diintegrasikan dengan model, baik untuk inisialisasi, kondisi batas, maupun penilaian. Pendekatan ini telah berhasil diimplementasikan pada proyek-proyek model dan integrasi data sebelumnya (contohnya, ABoVE dan NGEE-Tropics), dan kami berencana untuk mengembangkan proyek-proyek ini. Tujuan pemodelan dan sintesis data adalah untuk

- Mengidentifikasi proses-proses utama yang kurang terwakili dan wilayah dalam domain PANGEA yang menyebabkan ketidakpastian variabel dan proses utama dalam model yang ada.
- Mengembangkan kegiatan yang mirip dengan Observing System Simulation Experiments (OSSE) yang akan membantu menginformasikan lokasi dan gradien terbaik yang diperlukan untuk memaksimalkan keterwakilan lokasi intensif di dalam domain PANGEA.
- Mensintesis dan menskalakan pengukuran dari lanskap ke domain Core dan Extended PANGEA menggunakan penginderaan jauh dan pemodelan.
- Menerapkan proses dan teknik baru, serta meningkatkan proses dan teknik yang sudah ada dengan memanfaatkan integrasi data-model penginderaan jauh dan menerapkannya untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ilmiah PANGEA.

Selama beberapa dekade terakhir, model biosfer terestrial telah memperluas cakupan dan memasukkan banyak proses baru yang tidak dapat ditangani selama LBA (**Gambar 19**). Sebagai contoh, model berbasis proses kini dapat menyelesaikan keragaman struktural dan fungsional, berbagai macam dinamika gangguan alami dan antropogenik, serta keterkaitan yang kuat dengan siklus biogeokimia (Fisher dkk., 2018; Fisher dan Koven, 2020; Negron-Juarez dkk., 2020). Saat ini kita berada di masa di mana proses ekologi dalam beragam ekosistem yang menggerakkan siklus energi, air, karbon, dan nutrisi di Bumi harus diperhitungkan (Bonan et al., 2024). Demikian pula, beberapa kelas model telah semakin memanfaatkan berbagai pengamatan penginderaan jarak jauh, dan di seluruh PANGEA kita akan memiliki partisipasi berbagai model yang dapat menggunakan penginderaan jarak jauh untuk inisialisasi, kuantifikasi ketidakpastian, dan asimilasi data (**Tabel 6**). Selain itu, teknologi baru seperti kecerdasan buatan dapat memajukan kalibrasi model (Li dkk., 2023) dan menjadi bagian integral dari pemodelan prediktif (Schneider dkk., 2017; Reichstein dkk., 2019; Eyring dkk., 2024). Meskipun demikian, seiring dengan perkembangan model, menjawab tantangan masa depan seperti aklimatisasi, keterbatasan nutrisi, pergeseran komposisi fungsional, penghitungan emisi metana, dan partisi alokasi karbon antara biomassa di atas dan di bawah permukaan tanah akan semakin penting untuk menjaga akurasi model.

Memproyeksikan lintasan masa depan ekosistem tropis merupakan tantangan yang signifikan bagi ESM, karena model-model ini harus secara akurat merepresentasikan dinamika fisik, biogeokimia, dan ekosistem yang kompleks. Proyek perbandingan antar model seperti CMIP (Taylor et al., 2012; Eyring et al., 2016) dan TRENDY (Friedlingstein et al., 2023; Sitch et al., 2024) sangat penting untuk melacak perkembangan model berbasis proses dan mengidentifikasi area yang perlu ditingkatkan (Arora et al., 2020). Meskipun pembandingan dan validasi ESM telah menjadi lebih umum dalam beberapa tahun terakhir (Fisher dkk., 2018), masih jarang dilakukan evaluasi secara sistematis terhadap kinerja model



**Gambar 19.** Perubahan proses yang diselesaikan oleh model biosfer terestrial selama beberapa dekade, bersama dengan kampanye Ekologi Terestrial NASA sebelumnya. Garis putus-putus hitam: proses yang telah diimplementasikan, masih dalam tahap pengembangan yang signifikan. Garis putus-putus putih: proses yang mulai muncul dan diperkirakan akan muncul di tahun-tahun mendatang. Sumber untuk gambar asli: Fisher dan Koven (2020).

siklus karbon setelah model tersebut diperbarui (Fer dkk., 2021). Namun, perbandingan tersebut dengan set data observasi sangat penting untuk menguji hipotesis dan mengevaluasi akurasi prediksi (Negron-Juarez dkk., 2015; Fisher dkk., 2018). Proyek ILAMB menyediakan alat untuk melacak dan membandingkan kinerja model dengan menggunakan metode skor keterampilan yang komprehensif dan menggabungkan beberapa set data observasi untuk memperhitungkan ketidakpastian model (Hoffman dkk., 2017; Collier dkk., 2018; Braghiere dkk., 2023). Peningkatan kesepakatan antara simulasi historis dan observasi dapat mengindikasikan bahwa komponen model dapat disempurnakan untuk merepresentasikan proses dengan lebih baik, sehingga meningkatkan kepercayaan dalam proyeksi masa depan. Selain merepresentasikan proses secara akurat, kinerja model dapat secara signifikan dipengaruhi oleh kualitas dan keterwakilan kondisi awal dan kondisi batas (Hurt dkk., 2004; Antonarakis, 2014; de Frenne dkk., 2021). Data yang dikumpulkan melalui PANGAEA akan digunakan untuk memperluas perangkat pembandingan dengan mengintegrasikan data pengamatan lapangan dan penginderaan jauh, serta menyediakan kondisi awal dan kondisi batas yang mewakili kondisi aktual ekosistem hutan tropis.

**Tabel 6.** Daftar model yang tidak lengkap yang dapat mengintegrasikan data PANGEA dan membantu menjawab pertanyaan sains dan menguji hipotesis PANGEA.

Kelas-kelas model: PBM, model biosfer terestrial berbasis proses; HM, model hibrida berbasis data; TDM, model top-down; AI/ML, model berbasis pembelajaran mesin kecerdasan buatan; dan ABM, model berbasis agen. Subkelas dari model PBM: IBM, model berbasis individu; CBM, model berbasis kelompok; DGVM, model vegetasi global dinamis (tidak termasuk IBM dan CBM). CLiMA: Aliansi Pemodelan Iklim.

MODEL					CONTOH PELUANG INTEGRASI DATA-MODEL		PERTANYAAN- PERTANYAAN SAINS YANG DITANGANI
KELAS	SUBKELAS	CONTOH	REFERENSI	CONTOH PROSES YANG MENARIK	UDARA / RUANG ANGKASA PENGINDERAAN JAUH	PENGUKURAN LAPANGAN	
PBM	IBM	MEMBENTUK TROLL	Fischer dkk. (2016) Maréchaux & Chave (2017)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cadangan dan fluks karbon</li> <li>• Keanekaragaman Struktural/Fungsional</li> <li>• Tingkat demografi</li> <li>• Tingkat gangguan</li> </ul>	<b>STRUKTUR HUTAN/CADANGAN KARBON:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lidar dari udara</li> <li>• GEDI, EDGE*, NISAR*, BIOMASSA*</li> <li>• Landsat, Sentinel1-, -Sentinel2</li> </ul> <b>KOMPOSISI HUTAN:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Hiperspektral udara</li> <li>• DESIS, MEMANCARKAN, KECEPATAN, PRISMA, SBG*</li> </ul> <b>LAINNYA:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Fluks air/energi:</b> EKOSTRES</li> <li>• <b>Fluks C:</b> FLEX, OCO-2/3, TROPOMI</li> <li>• <b>Air tanah:</b> SMAP, SMOS, SWOT</li> <li>• <b>Kandungan air kanopi:</b> AMSR-E, EMIT</li> <li>• <b>Fenologi:</b> Landsat; Sentinel-2; drone RGB</li> <li>• <b>Awan/presipitasi:</b> GOES-R, GPM</li> <li>• <b>Tutupan lahan:</b> Landsat; Sentinel-2</li> <li>• <b>Area yang terbakar:</b> Landsat, Sentinel-2, VIIRS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plot inventarisasi hutan</li> <li>• Sampah/serpihan kayu kasar</li> <li>• Pemindaian laser terestrial</li> <li>• Ciri-ciri fungsional tanaman</li> <li>• Data meteorologi</li> <li>• Fluks kovarians eddy</li> <li>• COS / Isotop</li> <li>• Aliran getah</li> <li>• Kelembaban/suhu tanah</li> <li>• Ruang fluks tanah</li> <li>• Data GNSS berbasis menara</li> <li>• PhenoCams</li> </ul>	Q1-Q27
	VDM	BiomeE ED/ED3 ED2 Ent TBM FATES LPJ-GUESS	Weng dkk. (2022) Ma dkk. (2023) Longo dkk. (2019) Kim dkk. (2015) Koven dkk. (2020) Hickler dkk. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cadangan dan fluks karbon</li> <li>• Keanekaragaman Struktural/Fungsional</li> <li>• Tingkat demografi</li> <li>• Tingkat gangguan</li> <li>• Siklus air/energi</li> <li>• Siklus nutrisi</li> <li>• Perubahan tutupan lahan/penggunaan lahan</li> <li>• Area yang terbakar/emisi kebakaran</li> </ul>			
	DGVM	CLM  ELM JSBACH JULES LPJ ORCHIDEE	Lawrence dkk. (2019) Ricciuto dkk. (2018) Reick dkk. (2021) Harper dkk. (2018) Sitch dkk. (2008) Krinner dkk. (2005)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cadangan dan fluks karbon</li> <li>• Tingkat gangguan</li> <li>• Siklus air/energi</li> <li>• Siklus nutrisi</li> <li>• Perubahan tutupan lahan/penggunaan lahan</li> <li>• Area yang terbakar/emisi kebakaran</li> </ul>			
HM		KARDAMOM CLiMA  NASA-CASA	Bloom dkk. (2016) Braghiere dkk. (2023) Potter dkk. (2012)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cadangan dan fluks karbon</li> <li>• Siklus air/energi</li> <li>• Perubahan tutupan lahan/penggunaan lahan</li> <li>• Area yang terbakar/emisi kebakaran</li> </ul>			Q1-Q4; Q6; Q8; Q9; Q14- Q16; Q18; Q22-Q27

MODEL					CONTOH PELUANG INTEGRASI DATA-MODEL		PERTANYAAN- PERTANYAAN SAINS YANG DITANGANI
KELAS	SUBKELAS	CONTOH	REFERENSI	CONTOH PROSES YANG MENARIK	UDARA / RUANG ANGKASA PENGINDERAAN JAUH	PENGUKURAN LAPANGAN	
TDM		Pelacak Karbon CMS-Flux HYSPLIT STILT-VPRM	Peters dkk. (2007) Liu dkk. (2020) Stein dkk. (2015) Dayalu dkk. (2024)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fluks karbon</li> <li>Siklus air/energi</li> <li>Area yang terbakar/emisi kebakaran</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Fluks C:</b> FLEX, OCO-2/3, TROPOMI</li> <li><b>Fluks air/energi:</b> EKOSTRES</li> <li><b>Area yang terbakar:</b> Landsat, Sentinel-2, VIIRS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fluks kovarians eddy</li> <li>Data meteorologi</li> <li>COS/isotop</li> <li>Ruang fluks tanah</li> <li>PhenoCams</li> </ul>	Q1-Q2; Q4; Q6; Q9; Q14; Q17
		MapBiomass Kebakaran MetaFlux	Alencar dkk. (2022) Nathaniel dkk. (2023)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cadangan dan fluks karbon</li> <li>Siklus air/energi</li> <li>Area yang terbakar/emisi kebakaran</li> </ul>	<b>CADANGAN KARBON:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lidar/hiperspektral dari udara</li> <li>GED, EDGE*, NISAR*, BIOMASSA*</li> <li>Landsat, Sentinel-1 dan -2</li> </ul> <b>LAINNYA:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Fluks air/energi:</b> EKOSTRES</li> <li><b>Fluks C:</b> FLEX, OCO-2/3, TROPOMI</li> <li><b>Area yang terbakar:</b> Landsat, Sentinel-2, VIIRS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ciri-ciri fungsional tanaman</li> <li>Data meteorologi</li> <li>Fluks kovarians eddy</li> <li>COS/isotop</li> <li>Ruang fluks tanah</li> <li>Data GNSS berbasis menara</li> <li>PhenoCams</li> </ul>	Q1-Q2; Q4; Q6; Q9; Q14; Q17
		ABSOLUG SimPachamama RepastSymphony	von Essen & Lambin (2023) Andersen dkk. (2017) North dkk. (2013)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tutupan lahan/perubahan penggunaan lahan</li> <li>Keadaan/dinamika rumah tangga</li> <li>Metrik bioekonomi</li> <li>Tingkat reproduksi sapi</li> </ul>	<b>CADANGAN KARBON:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Lidar udara/ hiperspektral</li> <li>GED, EDGE*, NISAR*, BIOMASSA*</li> <li>DESI, MEMANCARKAN, KECEPATAN, PRISMA, SBG*</li> <li>Landsat, -Sentinel1 dan -2</li> </ul> <b>LAINNYA:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Tutupan Lahan:</b> Landsat; -Sentinel2</li> <li><b>Area yang terbakar:</b> Landsat, Sentinel2-, VIIRS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plot inventarisasi hutan</li> <li>Data pengelolaan hutan</li> <li>Hasil panen tanaman/kayu</li> <li>Data dinamika ternak</li> <li>Batas-batas wilayah</li> <li>Data sensus manusia</li> <li>Data survei</li> <li>Data percobaan pilihan</li> </ul>	Q21; Q28

### **Kotak 3. Contoh Pendekatan Integrasi Pemodelan PANGEA dan Data Penginderaan Jauh**

Dengan menggunakan Pertanyaan 6 PANGEA (variabilitas sifat fungsional lintas-benua dan dampaknya terhadap siklus karbon tropis) dan model FATES sebagai salah satu contohnya, tim PANGEA akan menggunakan pendekatan ketidakpastian parameter (misalnya, melalui ansambel simulasi dengan menggunakan PEcAn) untuk mengidentifikasi sifat-sifat daun dan hidrologis yang dapat diukur yang mendorong sensitivitas model fluks  $\text{CO}_2$  dan fluks  $\text{H}_2\text{O}$  di FATES (selanjutnya disebut sebagai sifat-sifat kunci). Tim ini kemudian akan mengkarakterisasi sifat-sifat kunci di lokasi-lokasi yang diminati melalui penelitian lapangan dan penginderaan jarak jauh di berbagai gangguan dan gradien iklim di kedua benua. Mereka akan menggunakan data yang terkumpul untuk membatasi distribusi parameter di seluruh gradien yang diminati. Mereka akan menggunakan pengukuran fluks dari menara dan pengambilan data penginderaan jauh untuk membangun hubungan yang muncul antara gradien sifat dan fluks yang berasal dari penginderaan jauh di gradien yang sama sebagai referensi. Mereka kemudian akan menggunakan model yang dibatasi untuk menyelidiki bagaimana ekosistem pada rezim curah hujan dan tingkat gangguan yang berbeda merespons kekeringan ekstrem, dan proses apa (misalnya, pembatasan kelembaban tanah atau defisit tekanan uap) yang mendorong respons terhadap kekeringan ekstrem. Dengan menggunakan pendekatan terintegrasi antara model dan akuisisi data, PANGEA akan memungkinkan kemajuan signifikan dalam kemampuan prediksi model untuk mengukur kerentanan hutan tropis terhadap perubahan global.

Kegiatan sintesis data PANGEA akan memfasilitasi peningkatan skala pengukuran lanskap di lapangan dan pengamatan udara yang dijelaskan pada *Bagian 6.2.4* dan *6.2.5* menjadi skala regional dan pantropis. Dengan mensintesis variabel-variabel kunci menggunakan set data penginderaan jauh dari udara yang dipasangkan dengan pengukuran di lapangan (contohnya, kelembaban tanah, sifat fungsional tanaman, fluks), kita dapat membuat hubungan empiris yang kuat dengan menggunakan model statistik untuk menginterpolasi variasi dari dinding ke dinding pada variabel-variabel penting. Sebagai contoh, pengukuran di lapangan terhadap kehilangan karbon biomassa akibat kekeringan di beberapa lokasi dapat digunakan untuk mengembangkan model statistik yang memprediksi perubahan biomassa sebagai respons terhadap variasi kelembaban tanah, VPD, frekuensi kekeringan, dan kelompok fungsional tanaman. Produk turunannya kemudian dapat digunakan untuk memetakan dampak pantropis pada biomassa hutan setelah skenario kekeringan tertentu, sehingga meningkatkan pemahaman kita mengenai respons ekosistem terhadap tekanan lingkungan di berbagai bentang alam tropis. Selain itu, kombinasi beberapa produk sintesis data dapat digunakan untuk mengeksplorasi hubungan yang muncul dari ekosistem hutan tropis. Sebagai contoh, peta tinggi kanopi sebelum kekeringan dapat dikontraskan dengan indeks stres evaporasi selama kondisi kekeringan. Kumpulan data ini kemudian dapat digunakan sebagai pembatas dan tolok ukur tambahan untuk model berbasis proses.

PANGEA akan memanfaatkan model kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin (AI/ML) untuk sintesis data karena ketangguhannya dalam menangani non-linearitas dan interaksi di antara proses dan prediktor multi-faktorial. AI/ML dapat digunakan lebih lanjut untuk meniru model berbasis proses (Swaminathan et al., 2024) dan mengeksplorasi ruang parametrik model secara lebih efisien atau melakukan peramalan jangka pendek/panjang (Li et al., 2023; Meunier et al., 2024). Untuk meningkatkan kemampuan interpretasi dan wawasan ke dalam proses ekologi yang mendasari model

AI/ML, PANGAEA akan menerapkan teknik-teknik seperti (1) Analisis Pentingnya Fitur, yang mengkuantifikasi dan menyoroti faktor-faktor yang paling berpengaruh yang mendorong prediksi model; dan (2) Plot Ketergantungan Parsial, yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan bagaimana perubahan dalam variabel tertentu berdampak pada hasil yang diprediksi. Selain itu, PANGAEA akan menggunakan teknik non-AI termasuk inferensi kausal (Venelli Pyles dkk., 2022), analisis deret waktu (Bullock dkk., 2020) termasuk Breaks For Additive Season and Trend Monitor (BFAST; DeVries dkk., 2015; Verbesselt dkk., 2012), dan statistika Bayesian (Goulamoussène dkk., 2017), yang akan memberikan wawasan mengenai hubungan sebab-akibat, mengungkap pola temporal, dan mengukur ketidakpastian dalam prediksi dan analisis. Strategi ini juga akan memberikan wawasan yang berharga dan alur kerja yang efektif yang dapat diintegrasikan ke dalam model berbasis proses untuk mengurangi ketidakpastian parameter dan meningkatkan akurasi prediksi (Dietze et al., 2013; Meunier et al., 2021).

Salah satu tantangan signifikan dalam memahami dinamika hutan tropis pada skala besar adalah relatif pendeknya rentang waktu sebagian besar produk data yang terkait dengan struktur, komposisi, cadangan karbon, dan fungsi hutan. Untuk mengatasi tantangan ini dan mendapatkan data pertumbuhan kembali biomassa hutan jangka panjang dengan resolusi tinggi, penelitian sebelumnya menggunakan pendekatan substitusi ruang-waktu, yang menghitung tingkat pemulihan variabel yang diminati (misalnya biomassa, tinggi kanopi) dari waktu referensi di area yang mengalami gangguan pada tahun yang berbeda (dan diketahui) (Heinrich dkk., 2021; Rappaport dkk., 2018). Pendekatan ini, ditambah dengan model AI/ML dan teknik sintesis data tradisional, memastikan bahwa PANGAEA dapat menilai dan memprediksi dinamika hutan tropis secara kuat di berbagai skala dan jangka waktu, mendukung penggunaan catatan satelit jangka panjang sebagai hasil dari akuisisi data PANGAEA dan kemajuan metodologis. Kronosequences telah digunakan untuk membatasi model berbasis proses yang mengkarakterisasi distribusi usia sejak gangguan terakhir (Ma et al., 2017).

### **6.3.2 Koordinasi dengan Komunitas Pemodelan dan Integrasi Data Lainnya**

Koordinasi dengan komunitas pemodelan, sintesis data, dan integrasi data yang sudah ada akan sangat penting untuk memperluas dampak PANGAEA di luar pengamatan lapangan dan satelit. Sebagai contoh, proyek TRENDY (Sitch et al., 2024), yang mengkoordinasikan simulasi siklus karbon global, merupakan salah satu kemitraan penting lainnya. Data spesifik lokasi PANGAEA yang terperinci untuk hutan tropis akan sangat penting untuk meningkatkan parameterisasi dan kinerja model TRENDY, terutama untuk dinamika dan fluks karbon regional di bioma tropis. Demikian pula, CMIP (Eyring et al., 2016), pemimpin global dalam pemodelan iklim, akan mendapatkan manfaat dari pengamatan PANGAEA, terutama dalam konteks meningkatkan representasi ekosistem tropis. Dataset ini akan sangat berharga untuk mengevaluasi dan meningkatkan model yang digunakan dalam upaya global, termasuk komponen lahan CMIP. Kemitraan ini akan meningkatkan representasi ekosistem tropis dalam model sistem bumi dengan menyediakan tolok ukur yang secara khusus disesuaikan dengan hutan tropis, sehingga membantu model global untuk mencapai akurasi yang lebih tinggi dalam prediksinya.

PANGAEA akan memastikan bahwa data dan temuannya berkontribusi pada upaya yang sedang berlangsung untuk meningkatkan kinerja model lahan dan mengurangi ketidakpastian dalam proyeksi global sebagai akibat dari respons hutan tropis terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan. Sebagai contoh, salah satu mitra penting PANGAEA adalah proyek ILAMB (Collier et al., 2018). Data yang dikumpulkan melalui PANGAEA dan produk turunannya yang dikembangkan melalui sintesis data

dapat menjadi tolok ukur baru dalam proses yang saat ini menunjukkan ketidakpastian yang tinggi di antara kumpulan data (misalnya, produktivitas primer bruto) atau tidak ada dalam ILAMB (misalnya, demografi vegetasi, hidrolika tanaman). Demikian pula, PANGEA akan berkolaborasi dengan PEcAn (Predictive Ecosystem Analyzer; LeBauer dkk., 2013), yang berfokus pada pemanfaatan data lapangan dan satelit untuk mengoptimalkan parameter model dan meningkatkan prediksi fluks karbon dan air (Dokoohaki dkk., 2022; Meunier dkk., 2021). PANGEA akan berkolaborasi dengan komunitas model berbasis proses yang telah berhasil mengintegrasikan pengamatan penginderaan jarak jauh terhadap demografi vegetasi, seperti Model Demografi Ekosistem (ED2; Antonarakis dkk., 2014; Longo dkk., 2020). Mitra utama lainnya adalah NGEE-Tropics, yang meskipun dijadwalkan akan berakhir pada saat PANGEA memasuki fase paling aktifnya, memberikan fondasi yang kaya akan alat pemodelan termasuk model FATES (Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator; Koven dkk., 2020), dan pengalaman yang luas dalam mendesain dan melaksanakan kampanye lapangan untuk mengumpulkan data yang bertujuan mengurangi ketidakpastian model. PANGEA juga dapat mengandalkan kemitraan dengan tim ilmuwan dan ahli teknologi transdisipliner, yang baru-baru ini didanai oleh program Advanced Information Systems Technology (AIST) NASA yang akan mengembangkan Earth System Digital Twin (ESDT) yang berjudul "Penyimpanan Karbon Afrika Tengah dan Koridor Keanekaragaman Hayati." ESDT ini mengintegrasikan data penginderaan jarak jauh yang ekstensif tentang karbon dan keanekaragaman hayati, data sosio-ekonomi, dan model pergerakan hewan ke dalam model sistem bumi. Tujuannya adalah untuk menilai status stok karbon hutan dan keanekaragaman hayati saat ini dan yang diproyeksikan, mengevaluasi efektivitas strategi konservasi, dan menganalisis dampak potensial dari tindakan global seperti Perjanjian Paris dan REDD+ terhadap ekosistem Afrika Tengah. Terakhir, Kantor Pemodelan dan Asimilasi Global (Global Modeling and Assimilation Office/GMAO) dapat melengkapi upaya PANGEA dengan teknik asimilasi data tingkat lanjut yang dapat digunakan sebagai tolok ukur dan syarat batas untuk model prediktif dinamika hutan tropis. Contoh produknya antara lain adalah produk SMAP Level-4 mengenai suhu tanah dan kelembaban tanah di zona perakaran (Reichle dkk., 2019) dan analisis Retrospektif Era Modern untuk Penelitian dan Aplikasi, Versi 2 (MERRA-2, Gelaro dkk., 2017).

Selain komunitas yang mengembangkan model berbasis proses, produk sintesis data, dan alur kerja perbandingan, PANGEA bertujuan untuk berkolaborasi dengan inisiatif yang secara langsung mengasimilasi data penginderaan jarak jauh ke dalam prediksi model. Sebagai contoh, pemodelan terbalik akan memainkan peran penting dalam strategi koordinasi PANGEA, menawarkan kerangka kerja untuk merekonsiliasi ketidaksesuaian antara fluks ekosistem yang diamati dan yang disimulasikan. Teknik ini akan membantu mengasimilasi set data berskala besar yang berasal dari satelit dengan pengukuran lapangan, sehingga memungkinkan prediksi yang lebih baik mengenai dinamika karbon dan air di bioma tropis (Liu dkk., 2016). PANGEA juga bertujuan untuk berkolaborasi dengan upaya pemodelan inovatif seperti NASA-CASA (NASA Carnegie-Ames-Stanford ecosystem model; Potter dkk., 1993; 2012) dan CARDAMOM (CARbon DATA-Model fraMework; Bloom dkk., 2020), yang menggabungkan akuisisi berbasis satelit dan lapangan untuk asimilasi dan pemodelan data siklus karbon dan telah diterapkan secara efektif di OSSE (Philip dkk., 2019). Terakhir, kolaborasi dengan CliMA (Climate Modeling Alliance; Schneider et al., 2017), yang sedang mengembangkan model sistem bumi mutakhir yang mengintegrasikan pembelajaran mesin dan teknik asimilasi data, akan meningkatkan kemampuan PANGEA dalam melakukan pengamatan hutan tropis. Kolaborasi ini akan membantu menjembatani kesenjangan antara pengumpulan data lapangan dan pemodelan prediktif, mendorong wawasan baru tentang fungsi ekosistem tropis dan perannya dalam sistem bumi.

### 6.3.3 Kegiatan Pemodelan dan Integrasi Data

Kegiatan pemodelan dan sintesis data akan dilakukan selama PANGEA berlangsung. Namun, tugas-tugas tersebut akan bergeser fokusnya seiring dengan berjalannya proyek. Setelah Tim Ilmu Pengetahuan dipilih untuk PANGEA, Kelompok Kerja Pemodelan dan Sintesis Data (SWG) akan dibentuk. Kelompok ini akan mengidentifikasi area dan proses utama yang saat ini menyebabkan ketidakpastian dalam model berbasis proses yang terkait dengan siklus karbon, air, energi, dan hara, serta keanekaragaman hayati dan interaksi manusia di hutan basah tropis. Kelompok ini akan mengembangkan upaya perbandingan antar model dengan menggunakan tolok ukur yang sudah ada (misalnya TRENDY, FLUXCOM) dan alat bantu (misalnya ILAMB) untuk menginformasikan desain proyek. SWG juga akan mencari tanggapan cepat melalui penggunaan pendekatan berdasarkan Eksperimen Simulasi Sistem Pengamatan (OSSE) dengan menggunakan model dan pendorong yang ada untuk memberikan penilaian pertama terhadap area utama ketidakpastian dan area yang kurang terwakili dalam pengamatan yang ada.

Setelah evaluasi awal dan upaya OSSE, fokus SWG akan bergeser ke beberapa tujuan yang saling melengkapi. Kegiatan yang terkait dengan model berbasis proses akan berfokus pada penerapan mekanisme kunci yang hilang yang diidentifikasi selama Fase 1, yang akan memajukan pemahaman tentang pendorong pola yang diamati pada siklus karbon, air, energi, dan hara dalam kampanye lapangan. Kegiatan yang terkait dengan sintesis akan memungkinkan peningkatan temuan dari skala lokal dan regional ke skala global. Penelitian sintesis data akan berfokus pada penggunaan dataset PANGEA untuk menghasilkan produk pada skala yang dapat diasimilasikan dengan model inversi dan hibrida, serta digunakan untuk perbandingan model berbasis proses. Pendekatan sintesis akan mencakup, tetapi tidak terbatas pada, kecerdasan buatan, pembelajaran mesin, dan substitusi ruang-untuk-waktu. Anggota kelompok yang bekerja dengan model inversi dan hibrida akan menggunakan dataset PANGEA dan produk sintesis turunannya untuk mengukur ketidakpastian dalam kuantifikasi skala variabel keadaan dan fluks. Upaya ini tidak akan berfokus pada satu set model dan teknik, melainkan menyatukan metode yang memungkinkan penskalaan pengukuran terbatas ruang dan waktu ke seluruh wilayah pantropis bersama dengan estimasi ketidakpastian yang kuat.

Selama sintesis akhir, PANGEA akan berfokus pada penelitian yang menggunakan model dan produk data yang telah dibatasi dan ditingkatkan yang dikembangkan sebelumnya untuk secara langsung menjawab pertanyaan-pertanyaan Ilmu Pengetahuan PANGEA dan menguji hipotesis-hipotesis utama. Penelitian yang menggunakan model berbasis proses pada tahap ini harus mengidentifikasi dan mengaitkan penyebab dan pendorong perubahan fungsi hutan dengan memanfaatkan set data PANGEA untuk inisialisasi dan kuantifikasi ketidakpastian. Sintesis data dan upaya pemodelan terbalik akan berfokus pada penjelasan tentang bagaimana sumbu utama variabilitas di hutan lembab tropis mendorong heterogenitas fluks karbon, energi, air, dan hara serta keanekaragaman hayati di dalam dan lintas benua. Bersama-sama, kegiatan-kegiatan ini akan memajukan pemahaman mengenai ketahanan hutan tropis di bawah perubahan global, dan memberikan jawaban integratif di seluruh Tema Ilmu Pengetahuan (*Bagian 3*).

## 7 Pengembangan Kapasitas, Pelatihan, dan Pendidikan

Memperkuat kapasitas bagi para peserta dari AS dan negara-negara tropis melalui investasi dalam pelatihan, pendidikan, dan pertukaran pengetahuan merupakan hal yang mendasar bagi keberhasilan PANGEA, dan sangat penting untuk mempersiapkan generasi ilmuwan berikutnya dengan keahlian dan alat yang diperlukan untuk memanfaatkan Sistem Pengamatan Bumi (EOS) milik NASA secara penuh, serta pengetahuan mengenai sistem sosial-ekologi, dan metode ilmiah serta manajemen dan analisis data dan pengembangan model ilmiah. Pengembangan kapasitas, pelatihan, dan pendidikan PANGEA akan melibatkan komunitas penelitian dan tenaga kerja yang berbasis di Amerika Serikat, serta komunitas lokal dan nasional di negara-negara hutan tropis yang bermitra dengan PANGEA. Pengalaman yang diperoleh selama proyek-proyek lapangan TE sebelumnya, terutama LBA, menunjukkan bahwa pengembangan kapasitas dapat bertahan lama dan memberikan manfaat bagi negara tuan rumah. PANGEA akan bermitra dengan program-program NASA yang sudah ada, serta dengan lembaga-lembaga lokal dan internasional yang berkolaborasi, untuk merencanakan dan terlibat dalam pertukaran pengetahuan, peningkatan kapasitas, pelatihan, dan kegiatan pendidikan yang sesuai untuk berbagai peserta potensial, termasuk mahasiswa, ilmuwan karir awal, tenaga kerja yang lebih luas, Masyarakat Adat dan Masyarakat Lokal (IPLC), dan para ilmuwan. Pengembangan kapasitas, pelatihan, dan pendidikan akan berfokus pada mendorong partisipasi Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal (IPLC), tenaga kerja yang lebih luas, dan kelompok mahasiswa sarjana dan pascasarjana.

Kegiatan pengembangan kapasitas, pelatihan, dan pendidikan PANGEA akan dirancang sesuai dengan masing-masing audiens yang spesifik. Selama pengembangan Rencana Percobaan Ringkas, dan kemudian secara berkala selama PANGEA, penilaian akan dilakukan untuk menilai apa yang dibutuhkan dan diinginkan oleh anggota komunitas PANGEA yang berbeda dalam hal pengembangan kapasitas, pelatihan, dan kegiatan pendidikan. Penilaian ini akan mengidentifikasi penerima manfaat potensial dan menyelaraskannya dengan sumber daya yang tersedia. Pelatihan merupakan target yang lebih disukai untuk berbagai peluang pendanaan bersama (lihat *Bagian 10.2, Peluang Pendanaan Bersama*).

### 7.1 Pengembangan Tenaga Kerja

PANGEA akan memajukan tujuan yang diuraikan dalam Visi National Science Board (NSB) 2030 dengan mendorong pengembangan tenaga kerja di bidang STEM. Melalui teknologi penginderaan jarak jauh yang canggih, pengembangan dan aplikasi model sistem bumi, serta penelitian lapangan internasional yang ekstensif, PANGEA akan mengembangkan tenaga kerja berpendidikan STEM yang dilengkapi dengan keahlian dalam penelitian sains dan teknik dasar serta ML/AI, termasuk pembelajaran mendalam, model bahasa besar, visi komputer, dan asimilasi data, untuk mengatasi tantangan ekologi dan sosial yang kritis di wilayah-wilayah pantropis dan keterampilan yang dapat diterapkan secara global. PANGEA memberikan kesempatan pelatihan langsung bagi mahasiswa dan ilmuwan karir awal, menjembatani ilmu pengetahuan dasar dengan alat terapan dan pengambilan keputusan yang berorientasi pada solusi, dan memastikan inklusivitas dengan melibatkan lembaga-lembaga yang melayani minoritas (MSI). Selain mendukung upaya pelatihan dan pengembangan tenaga kerja NASA yang sudah ada melalui ARSET, DEVELOP, dan Prakarsa Masyarakat Adat NASA,

program pelatihan PANGEA selaras dengan program Kecerdasan Buatan untuk Prediksi Sistem Bumi (AI4ESP) dari DOE serta program Riset, Inovasi, Sinergi, dan Pendidikan (RISE) NSF dan Peluang Geosains untuk Kepemimpinan dalam Keberagaman (GOLD-EN) (**Tabel 1**). Dengan mengintegrasikan mitra di seluruh akademisi, pemerintah, dan lembaga internasional, PANGEA akan memajukan penelitian fundamental dan kesiapan tenaga kerja yang selaras dengan Visi 2030 NSB.

## 7.2 Mendidik Sekelompok Mahasiswa Pascasarjana

PANGEA akan memberikan kesempatan unik bagi generasi mahasiswa sarjana dan pascasarjana dari seluruh Amerika Serikat dan negara-negara tropis tuan rumah untuk mengembangkan penelitian yang sangat integratif dan transdisipliner. Tujuan ilmiah PANGEA akan memungkinkan mahasiswa untuk memahami ekosistem tropis dan pentingnya ekosistem tersebut bagi planet ini, mengapresiasi sistem ekologi sosial dan melaksanakan proyek penelitian intensif data dengan menggunakan pengamatan lapangan dan kumpulan data penginderaan jauh, serta mengembangkan keterampilan penting dalam sintesis data (termasuk kecerdasan buatan, pembelajaran mesin, dan asimilasi data) serta pemodelan berbasis proses. Membekali mahasiswa dengan keterampilan untuk memahami pentingnya dan mempromosikan konservasi dan pengelolaan lanskap hutan tropis yang berkelanjutan, mengelola "big data", kecerdasan buatan, dan pemodelan yang intensif secara komputasi, akan mempersiapkan mahasiswa untuk berbagai peluang karir di bidang akademis, pemerintah, dan industri. Selain itu, pelaksanaan proyek PANGEA akan bersifat kolaboratif, dan akan menyatukan para ilmuwan dari berbagai institusi dan universitas, baik di AS maupun internasional. Dengan berpartisipasi dalam kegiatan kerja lapangan dan acara ilmiah, mahasiswa sarjana dan pascasarjana akan secara langsung berinteraksi dan berkolaborasi dengan para peneliti yang berbasis di NASA dan lembaga-lembaga AS lainnya (misalnya, DOE, USFS, USGS). Hal ini akan membuka peluang bagi para mahasiswa untuk mengejar karir jangka panjang di lembaga-lembaga ini dan mengejar sektor swasta dan kegiatan kewirausahaan di sektor-sektor terkait. PANGEA akan memungkinkan para mahasiswa untuk mengembangkan keterampilan berpikir kritis kolaboratif yang diperlukan untuk kemitraan multi-lembaga dan internasional.

PANGEA juga akan melanjutkan peran penting NASA dalam mempromosikan pengembangan kapasitas yang kuat secara internasional, berdasarkan pengalaman LBA di mana pengembangan kapasitas saling menguntungkan bagi kontribusi Program Ekologi Terestrial NASA untuk fase pertama upaya LBA (LBA-ECO) dan untuk tuan rumah NASA di Brasil, Amerika Selatan. Brasil membutuhkan komponen pelatihan dan pendidikan untuk setiap investigasi LBA, yang ditentukan oleh sumber daya yang tersedia dan umumnya terkait dengan program akademik di Brasil. Kelompok mahasiswa terbesar yang dilatih dalam LBA adalah mahasiswa sarjana Brasil yang dibayar untuk terlibat dalam proyek-proyek sains. Meskipun para mahasiswa ini umumnya melakukan pekerjaan teknis, banyak dari mereka yang menjadi penulis pendamping dalam makalah, dan bahkan ada yang menjadi penulis utama. Program ini membantu mengidentifikasi siswa yang terlibat dalam mengejar gelar master dan doktor. Sekitar 500 mahasiswa Brasil memperoleh gelar MS dan PhD yang terkait dengan investigasi LBA. Sementara sebagian kecil mahasiswa yang didanai dibiayai oleh proyek-proyek penelitian NASA (terutama untuk mahasiswa yang memperoleh gelar di AS), sebagian besar beasiswa diberikan melalui mekanisme yang ada di Brasil dari kementerian pendidikan dan sains nasional mereka dan melalui yayasan penelitian di tingkat negara bagian. Meskipun total investasi dalam bentuk dolar kurang dari 5% dari investasi NASA di LBA-ECO dan kegiatan penelitian asing lainnya, hasil yang diperoleh dalam jangka pendek dan jangka panjang sangat besar. Di Brasil, banyak lulusan LBA yang kemudian

melakukan pekerjaan penting di bidang lingkungan di universitas, di lembaga pemerintah kota, negara bagian, dan nasional, serta di LSM, melebihi harapan Brasil akan dampak pelatihan dan pendidikan LBA.

Peluang terbesar PANGEA untuk pengembangan kapasitas dan pelatihan ada di dalam Tim Sains. Mengikuti model LBA dan BioSCape, NASA dapat mendorong atau mewajibkan proposal untuk dikembangkan bersama dengan peneliti lokal. Persyaratan ini memastikan bahwa sekitar 50% dari tim sains BioSCape berasal dari lembaga-lembaga di Afrika Selatan. Demikian juga, pengumuman pendanaan PANGEA dapat mensyaratkan atau sangat mendorong pelatihan, pendidikan, dan peningkatan kapasitas sebagai bagian dari kegiatan yang diusulkan, serupa dengan apa yang dicapai selama LBA. PANGEA dapat bekerja secara langsung dengan inisiatif yang sudah ada seperti Amazon Institute of Technology (AmIT), tim LBA Fase 3, Congo Basin Science Initiative (CBSI), Central African Forest Research Network (R2FAC), dan program Riset Terapan Ekologi dan Ilmu Sosial (RESSAC) untuk mencapai tujuan tersebut.

**Pendekatan PANGEA terhadap ilmu pengetahuan yang adil, pengembangan kapasitas, dan pelatihan akan secara langsung menghadapi masalah kampanye layang dan ilmu pengetahuan parasut. Berdasarkan keberhasilan dari LBA, kami percaya bahwa PANGEA dapat menerbitkan 100 makalah penulis pertama dari para ilmuwan di Afrika, yang akan berkontribusi dalam menutup kesenjangan Indeks Parasut di Afrika Tengah (Culotta et al., 2024). Para ilmuwan Afrika ini akan melanjutkan warisan PANGEA, berkolaborasi dengan rekan-rekan internasional di seluruh wilayah tropis, setelah proyek ini berakhir.**

Tujuan penting lainnya dari strategi pengembangan kapasitas PANGEA adalah untuk memperkuat dan mengembangkan komunitas pengguna data Bumi NASA di daerah tropis, termasuk masyarakat adat dan komunitas lokal. Kegiatan PANGEA di udara akan menghasilkan banyak kegembiraan seputar potensi penginderaan jauh untuk banyak aplikasi, termasuk aplikasi yang berfokus pada mitigasi perubahan iklim dan pemantauan karbon, konservasi keanekaragaman hayati, pertanian berkelanjutan, serta pencegahan dan pemantauan risiko bencana. Kelompok pengguna yang beragam akan mendapat manfaat besar dari kemajuan metodologi PANGEA dalam menggunakan aset satelit NASA. PANGEA akan menggunakan momentum yang diciptakan oleh kampanye udara untuk mengkatalisasi dan mempromosikan aplikasi yang lebih luas dari kumpulan data spaceborne NASA, terutama yang cocok untuk diperiksa bersama produk data udara, misalnya, EMIT, PACE, ECOSTRESS, GEDI, dan di masa depan NISAR dan SBG. Bekerja sama dengan mitra regional, PANGEA akan berkolaborasi dengan negara-negara tuan rumah dalam pengembangan bank data nasional sehingga pengetahuan yang muncul dari PANGEA dapat diintegrasikan dan diterapkan pada permintaan regional dan nasional untuk promosi sosial ekonomi dan pengembangan kebijakan. Pendekatan PANGEA terhadap pengembangan kapasitas bermaksud untuk membangun kelompok pengguna NASA Early Adopter di daerah tropis - terutama untuk NISAR dan SBG, serta untuk misi ESA seperti BIOMASS, CHIME, dan FLEX. PANGEA akan memanfaatkan strategi Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi NASA untuk "membangun kapasitas melalui serangkaian kemitraan yang luas dan beragam, baik yang tradisional maupun yang baru" (St Germain, 2024 - [Rencana Strategis ES2A](#)). Mitra PANGEA akan mencakup "lembaga pemerintah nasional dan internasional, akademisi, organisasi nonpemerintah dan internasional, sektor swasta, dan filantropi," sesuai dengan strategi tersebut. PANGEA akan bermitra dengan program NASA yang sudah ada dan upaya pelatihan yang dipimpin oleh para mitra, sejalan dengan tujuan untuk "meningkatkan inisiatif penguatan nilai yang sudah ada" yang "dapat bersifat nasional atau internasional" untuk "mencapai kedalaman dan keluasan dalam

dampak dan dukungan kami terhadap kemanusiaan dengan tetap mengefektifkan biaya" (St Germain, 2024 - [Rencana Strategis ES2A](#)). Contoh-contohnya tercantum dalam **Tabel 7**.

**Pada akhirnya, PANGEA merupakan kesempatan untuk meningkatkan kolaborasi dan pemahaman lintas benua, mewariskan pengetahuan dan kumpulan data, serta mendukung aksi langsung untuk melestarikan hutan tropis dan memitigasi perubahan iklim. Warisan yang paling mungkin dan paling lama bertahan adalah inti dasar para ahli yang dilatih dan didukung yang akan berkontribusi dalam memimpin generasi berikutnya dalam kemajuan ilmiah dan teknologi serta tindakan berorientasi solusi untuk mengatasi tantangan paling mendesak di bumi.**

## 8 Strategi Keterlibatan Masyarakat

PANGEA akan melibatkan berbagai komunitas untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan sains, mengidentifikasi sinergi dengan prioritas penelitian lokal, dan mengimplementasikan PANGEA dengan cara yang bermanfaat bagi bentang alam dan negara-negara yang akan berpartisipasi dalam penelitian ini, serta membangun dan memperkuat kemitraan jangka panjang antara lembaga-lembaga yang berbasis di Amerika Serikat dan lembaga-lembaga internasional. Strategi ini memanfaatkan pengetahuan, keahlian, dan pengalaman yang dibagikan selama studi pelingkupan PANGEA, yang melibatkan lebih dari 800 individu dan 300 organisasi dari 42 negara di 5 benua melalui (a) lokakarya konsultatif, (b) kegiatan penjangkauan, (c) diskusi kelompok kerja, (d) pertemuan bilateral, dan (e) survei melalui internet. Di Amerika Serikat, PANGEA telah bekerja sama dengan lebih dari 110 lembaga federal dan institusi AS di 30 negara bagian dan Washington, DC. Penjelasan lebih rinci mengenai metode pelibatan yang digunakan selama studi pelingkupan dapat dilihat pada *Lampiran C*. Di sini, kami menyajikan daftar komunitas yang diprioritaskan untuk dilibatkan dalam PANGEA, prinsip-prinsip yang mendasari upaya pelibatan PANGEA, dan strategi PANGEA dalam melibatkan masyarakat lokal dan membangun warisan jangka panjang yang positif selama dan setelah proyek berlangsung.

**Tabel 7.** Mitra dan penyedia layanan potensial yang dapat berkolaborasi dengan PANGEA untuk kegiatan pelatihan dan peningkatan kapasitas.

MITRA	AKTIVITAS	TARGET AUDIENS
AI4ESP	Bekerja sama dengan AI4ESP (Kecerdasan Buatan untuk Prediksi Sistem Bumi) untuk mengintegrasikan AI dengan model ES guna meningkatkan kemampuan prediksi, mengatasi tantangan ilmiah, dan meningkatkan integrasi data serta teknik observasi.	Peneliti dan mahasiswa, pengambil keputusan
TUJUAN	Pelatihan pascasarjana, penelitian, dan keterlibatan publik dalam bidang matematika, sains, dan pembelajaran mesin. Jaringan AIMS memiliki 5 pusat keunggulan yang mengajarkan African Masters in Machine Intelligence (AMMI), termasuk di Kamerun, Ghana, dan Rwanda. Jaringan AIMS memiliki lebih dari 2.400 alumni dari 44 negara Afrika, di mana 33% di antaranya adalah perempuan.	Mahasiswa Afrika
ARSET	Seri webinar pelatihan multipart, yang dikembangkan dari model pelatihan tatap muka yang diujicobakan selama BioSCape.	Pengambil keputusan, akademisi, ilmuwan
ATBC	Pelatihan, lokakarya, dan jaringan di antara para peneliti secara pantropis dengan Association for Tropical Biology and Conservation (ATBC) yang mempromosikan penelitian, pendidikan, dan komunikasi tentang biologi dan konservasi tropis. ATBC memiliki ~1.000 anggota dari 70 negara dan mendukung pengembangan kapasitas dan menyelenggarakan pertemuan internasional.	Anggota ATBC dari lebih dari 70 negara
DAAC	Buku catatan pelatihan dan lokakarya yang dimodelkan berdasarkan yang telah dipresentasikan pada konferensi (misalnya, AGU, ESA, ATBC) yang memfasilitasi akses ke NASA EOS.	Peneliti di semua tahap karier
MENGEMBANGKAN	Bermitra dengan para pengambil keputusan yang tertarik untuk menggunakan data Bumi NASA untuk mendukung pekerjaan mereka. Setiap mitra akan memiliki tim DEVELOP yang terdiri dari 4-5 orang yang bekerja bersama mereka selama 10 minggu (dapat diperpanjang) untuk mengembangkan kapasitas dalam menggunakan data Bumi NASA untuk memenuhi kebutuhan mereka.	Para pengambil keputusan dan tenaga kerja yang lebih luas
FLUXNET	Pelatihan dan alat untuk menggunakan/menganalisis data menara fluks kovarian eddy, termasuk dalam berbagai bahasa (saat ini dalam bahasa Spanyol dan Inggris). PANGEA akan bekerja sama dengan FLUXNET untuk memperluas terjemahan ke bahasa Prancis dan Portugis dan mengembangkan materi pelatihan baru yang mengintegrasikan penginderaan jarak jauh dan data menara fluks.	Peneliti dan mahasiswa
GLOBE	Kegiatan pendidikan yang disesuaikan secara lokal untuk siswa, guru, dan warga negara K-12 termasuk elemen pelatihan untuk pelatih yang memungkinkan penggandaan. Kesempatan untuk menyalurkan kegembiraan dari kampanye udara dan data Observasi Bumi.	Murid, guru, dan masyarakat K-12
INISIATIF MASYARAKAT ADAT	Berkolaborasi dengan masyarakat adat untuk meningkatkan penggunaan EOS dalam pengambilan keputusan. PANGEA mengembangkan kemitraan dengan organisasi aliansi masyarakat adat di daerah tropis, termasuk GATC dan RRI, dan akan berkoordinasi dengan Prakarsa Masyarakat Adat NASA untuk memperluas upaya pengembangan pelatihan bersama, mendukung proyek-proyek yang dipimpin oleh masyarakat adat, memperkuat hubungan, dan menciptakan peluang untuk inklusi masyarakat adat dalam ESD NASA.	Masyarakat adat
NSF RISE	Membina kolaborasi transdisipliner yang melibatkan komunitas geosains yang lebih luas untuk mendorong penemuan dan inovasi dalam pengembangan tenaga kerja.	Peneliti dan mahasiswa
SELPER	Mengidentifikasi peluang kemitraan dengan SELPER, Masyarakat Amerika Latin untuk Penginderaan Jauh dan Sistem Informasi Antariksa untuk mengembangkan pelatihan penginderaan jauh dan kegiatan penelitian di seluruh negara Amerika Latin. SELPER mempromosikan kegiatan-kegiatan ini dalam lokakarya, simposium, dan kursus singkat, sering kali melalui kemitraan dengan komunitas internasional yang lebih luas.	Anggota SELPER dan peserta pertemuan ilmiah
SERVIR	Berkoordinasi dengan pusat-pusat SERVIR untuk mengembangkan layanan khusus bagi kebutuhan pengambilan keputusan spesifik organisasi mitra lokal, dengan mengembangkan Perangkat Perencanaan SERVIR untuk memberikan instruksi yang ditargetkan secara regional mengenai cara menilai dan melaksanakan pertanian, restorasi hutan, dan intervensi lainnya yang berdampak.	Pusat-pusat SERVIR, mitra pelaksana (pemerintah lokal dan nasional, LSM)

## 8.1 Pengembangan Bersama dan Mitra PANGEA

Penelitian PANGEA mengenai hutan tropis akan melengkapi dan memperluas berbagai upaya yang sudah ada. Data yang diperoleh selama kampanye lapangan PANGEA akan digunakan untuk inisialisasi, penilaian, dan pembatasan prediksi berbagai model ekosistem terestrial berbasis proses dan Model Sistem Bumi di hutan tropis. Contoh model termasuk FATES, sebuah model yang pengembangannya didukung oleh DOE melalui NGEE-Tropics, serta beberapa model yang saat ini dan sebelumnya didukung oleh NASA, seperti BiomeE (NASA-GISS), ED2 (dipimpin oleh Universitas Harvard), ED3 (Universitas Maryland), komponen lahan CliMA (Institut Teknologi California dan JPL), dan CARDAMOM (JPL) (*Bagian 6.3*). PANGEA akan meningkatkan upaya SilvaCarbon dengan menggabungkan berbagai lokasi lapangan dan data penginderaan jarak jauh yang lebih luas, menawarkan wawasan yang lebih dalam mengenai dinamika karbon dan proses hutan pada skala regional dan global sekaligus memperkuat analisis pemantauan, pelaporan, dan verifikasi (MRV). Peningkatan pemahaman dan analisis dinamika karbon dan fungsi ekosistem akan menjadi elemen kunci untuk menginformasikan Program Internasional USDA USFS dalam mengembangkan strategi pengelolaan dan konservasi hutan dengan organisasi internasional. Beberapa dari upaya ini terbatas pada wilayah geografis kecil atau mewakili jaringan situs individu. Upaya lainnya, seperti inisiatif One Forest Vision (OFVi) dan GEO-TREES, memiliki ambisi pantropis seperti PANGEA. Berbagai peluang kemitraan diilustrasikan dengan contoh-contoh pada **Tabel 5** dan **Tabel B-1**. *Lampiran B* menjelaskan secara lebih rinci masyarakat yang akan dilibatkan oleh PANGEA, daftar mitra PANGEA saat ini berdasarkan jenis masyarakat, dan membahas pertimbangan keterlibatan yang lebih spesifik untuk masing-masing mitra.

PANGEA mengartikan kata *komunitas* secara luas untuk mencakup berbagai macam kelompok formal dan informal yang menganggap diri mereka sebagai anggota suatu kelompok, yang dapat berbagi minat, pengalaman, sumber daya, kegiatan, profesi, mata pencaharian, budaya, geografi, asal-usul, bahasa, atau kombinasi dari hal-hal tersebut di atas. Studi pelingkupan mengidentifikasi sepuluh jenis komunitas yang akan diprioritaskan untuk dilibatkan oleh PANGEA: (1) NASA; (2) lembaga pemerintah AS lainnya; (3) badan antariksa internasional dan fasilitas pendukung; (3) (3) lembaga pemerintah AS dan lembaga pemerintah asing, termasuk pembuat kebijakan dan lembaga penelitian nasional; (4) komunitas akademis, lembaga ilmiah, dan masyarakat ilmiah; (5) prakarsa penelitian internasional yang terkoordinasi; (6) masyarakat sipil, termasuk organisasi konservasi (CSO); (7) masyarakat adat dan aliansi serta organisasi masyarakat setempat; (8) komunitas donor; (9) sektor swasta, termasuk industri pertanian dan perikanan; dan (10) lembaga antarpemerintah.

PANGEA akan berkomitmen untuk melibatkan masyarakat dengan cara yang inklusif dan tidak hirarkis. Setiap komunitas akan berperan dalam perencanaan, implementasi, dan warisan jangka panjang PANGEA. Keterlibatan yang saling menghormati dan setara dengan Masyarakat Adat dan CSO, misalnya, sangat penting untuk mempelajari ekosistem dan kebutuhan lokal, mengakses lokasi penelitian, memberdayakan pengumpulan data jangka panjang di lapangan, dan menghubungkan penelitian PANGEA dengan pengambilan keputusan pengelolaan lahan lokal. PANGEA harus terlibat dengan lembaga-lembaga ilmiah lokal dan internasional untuk membangun pekerjaan mereka, mengidentifikasi sinergi, dan memanfaatkan pendanaan bersama dan sumber daya untuk mencapai lebih banyak hal secara kolaboratif, dan berinvestasi dalam pelatihan formal dan kurikulum sehingga generasi ilmuwan saat ini dan yang akan datang dapat memperoleh manfaat dari PANGEA. Dukungan dari lembaga pemerintah akan sangat penting bagi upaya pengumpulan data dari udara dan darat serta strategi Aksi Bumi PANGEA. Badan-badan pemerintah nasional dan sub-nasional juga memiliki posisi

yang baik untuk menerapkan temuan-temuan kunci dari penelitian PANGEA dalam meningkatkan pemantauan dan pelaporan iklim dan keanekaragaman hayati di seluruh negeri, serta mengembangkan strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim dan hilangnya keanekaragaman hayati yang lebih terinformasi. Kolaborasi dengan organisasi antar pemerintah dan donor yang peduli terhadap iklim dapat memungkinkan PANGEA untuk mendukung kegiatan yang tidak dapat dilakukan dengan menggunakan dana NASA saja, termasuk melibatkan institusi lokal dengan cara yang lebih inklusif dan adil secara finansial. Banyak perusahaan swasta dan asosiasi industri yang ingin mempelajari lebih lanjut tentang lingkungan mereka yang berubah dan mengumpulkan data dari darat, udara, dan ruang angkasa untuk memahami dampaknya dan memastikan keberlanjutan produk pertanian dan rantai pasokan produk lainnya. Meskipun kepentingan, tujuan, dan titik-titik potensial untuk keterlibatan dan kolaborasi sangat bervariasi, semua komunitas ini dapat berkontribusi pada keberhasilan dan warisan jangka panjang yang positif dari PANGEA.

## 8.2 Strategi Keterlibatan

Kegiatan PANGEA akan berkoordinasi dengan proyek-proyek yang sudah ada dan yang akan datang dari lembaga-lembaga lain dan negara-negara lain. Berdasarkan pelajaran yang dipetik dari program LBA yang dipimpin oleh Brasil, PANGEA akan mendorong adanya komite pengarah ilmiah internasional (SSC). SSC akan memperkuat dan berkoordinasi dengan organisasi, aliansi, dan kegiatan yang ada untuk memastikan bahwa PANGEA mendukung pengembangan jaringan jangka panjang yang akan meningkatkan dan mempertahankan aksesibilitas, kegunaan, transferabilitas, dan manfaat dari data, metode, model, dan pengetahuan tentang ekosistem tropis. SSC PANGEA akan bersama-sama mengembangkan strategi untuk memastikan bahwa para ilmuwan, institusi lokal, dan masyarakat bekerja sama selama proyek PANGEA untuk berkolaborasi secara efektif dalam konteks geografis dan budaya yang beragam. Selama LBA, SSC bertemu dua kali setiap tahun dan berfungsi sebagai pusat informasi untuk proyek-proyek nasional. Komite ini memiliki sejumlah tugas termasuk merekomendasikan proyek-proyek untuk diikutsertakan dalam LBA berdasarkan kriteria seperti pokok bahasan, kecukupan pengaturan mitra, dan rencana pengembangan kapasitas. SSC memikul sebagian besar beban yang seharusnya menjadi tanggung jawab manajer lembaga nasional. Organisasi yang sudah ada seperti Prakarsa Ilmu Pengetahuan Lembah Kongo dan LBA Brasil yang masih ada saat ini, siap menjadi mitra untuk koordinasi studi ilmiah PANGEA. Demikian pula, PANGEA menjalin hubungan dengan GATC selama proses pelingkupan. GATC, yang dibangun selama lebih dari 10 tahun oleh masyarakat adat tropis, mewakili 24 negara dan lebih dari 35 juta orang yang mendiami lebih dari 958 juta hektar lahan. Kemitraan dengan GATC akan mendukung kemampuan PANGEA untuk melibatkan masyarakat adat dengan cara yang bermakna dan saling menguntungkan.

Selama ABoVE, Kantor Siklus Karbon dan Ekosistem NASA memulai konsultasi dengan Suku Bangsa Pertama Kanada dan kelompok Pribumi Alaska sebelum tim pendefinisian sains dikumpulkan. ABoVE secara proaktif terlibat dengan anggota First Nations untuk menyelesaikan desain eksperimental di Fase 1, sebelum kegiatan lapangan dimulai. Tim ABoVE terus terlibat dengan anggota First Nations untuk memberikan informasi terbaru mengenai kegiatan, terutama yang berkaitan dengan gangguan yang relevan (misalnya, kebakaran). Sebagai contoh, ABoVE memprioritaskan untuk meninjau kembali area yang terbakar dan memberikan informasi untuk membantu masyarakat memahami, beradaptasi, dan mengatasi bencana. PANGEA akan mengembangkan pelajaran penting yang didapat dari ABoVE.

**Proses produksi bersama dimulai pada saat pelingkupan PANGEA dan penulisan buku putih ini, yang telah dilakukan melalui kerja sama dengan para pemimpin Masyarakat Adat dari Aliansi Global Komunitas Teritorial (GATC). Jika PANGEA terpilih, produksi bersama dengan Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal akan segera dimulai dan akan berkelanjutan.**

PANGEA juga akan bermitra dengan banyak lembaga ilmiah yang berlokasi di atau memiliki keahlian penelitian di hutan tropis. PANGEA akan membangun jaringan perintis yang terdiri dari para ahli penelitian, ilmuwan karir awal, dan institusi ilmiah. Kepentingan khusus dari kemitraan ini adalah untuk memfasilitasi pengembangan bersama pengetahuan dan mendukung transfer teknologi untuk menghasilkan kapasitas di lembaga-lembaga lokal dan regional. Fokus utama dari jaringan PANGEA adalah untuk mengikutsertakan, melibatkan, dan melatih generasi ilmuwan dan tenaga kerja teknis berikutnya. PANGEA akan melibatkan lembaga-lembaga ilmiah mitra dengan cara-cara berikut:

- Bersama-sama mengembangkan penelitian, analisis, dan aplikasi potensial.
- Mengidentifikasi lokasi lapangan, infrastruktur penelitian, dan kemampuan yang penting bagi tujuan penelitian PANGEA.
- Memproduksi, berbagi, dan mengelola data secara bersama-sama; mendukung pengembangan infrastruktur data, peralatan, dan keahlian manajemen di lembaga lokal dan regional; mendukung pembentukan bank data regional atau nasional untuk mengkurasi data lapangan dan data penginderaan jarak jauh serta keluaran model numerik sehingga pengetahuan yang muncul dapat diintegrasikan dan diterapkan pada permintaan regional dan nasional untuk pembangunan sosial ekonomi dan pengembangan kebijakan.
- Memperkuat dan memperluas infrastruktur dan instrumentasi penelitian bagi lembaga-lembaga ilmiah lokal dan regional untuk dapat mengembangkan dan melaksanakan penelitian jangka panjang.
- Merancang dan mengimplementasikan strategi untuk mendukung pengembangan kapasitas fakultas dan peneliti karir awal di universitas dan lembaga penelitian.

Penerapan PANGEA juga memiliki potensi yang kuat untuk melibatkan sektor swasta, termasuk, namun tidak terbatas pada (a) agribisnis dan koperasi yang membudidayakan dan/atau memanen hasil pertanian, kayu, dan hasil hutan non-kayu; (b) industri ekstraktif; (c) perusahaan energi; (d) perusahaan big data; (e) konglomerat dan lembaga keuangan yang berinvestasi, membeli, dan/atau menjual salah satu dari jenis-jenis perusahaan yang telah disebutkan di atas; dan (f) perusahaan yang terlibat dalam ekowisata. Profil perusahaan yang ada di setiap lanskap di mana PANGEA diimplementasikan akan bervariasi, mulai dari korporasi hingga usaha kecil dan menengah, koperasi, dan asosiasi.

## 9 Mengaktifkan Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Bertindak

**PANGEA menekankan pada bioma tropis yang secara historis kurang diperhatikan dan memberdayakan salah satu wilayah paling rentan di planet ini untuk mengatasi konsekuensi perubahan iklim dan penggunaan lahan, sekaligus mengakui dan mendokumentasikan kontribusi global keanekaragaman hayati tropis terhadap ketahanan dalam sistem Bumi yang saling terhubung.** PANGEA akan memprioritaskan upaya strategis NASA Earth Science to Action (ES2A) yang menutup

kesenjangan antara teknologi yang berkembang pesat dan kebutuhan masyarakat untuk mengakses platform pengambilan keputusan yang berbasis sains.

Pencapaian tujuan ilmu pengetahuan dan pengukuran PANGEA akan memajukan kemampuan pemantauan di bioma hutan tropis dengan cara-cara yang memenuhi kebutuhan pengguna akhir secara langsung, di mana kesenjangan data dan pengetahuan membatasi kegunaan sensor satelit yang baru dan yang akan datang. Bagian ini menyajikan cara-cara yang akan dilakukan PANGEA untuk mendukung Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi (Earth Science to Action/ES2A) di bidang-bidang penting seperti perubahan iklim dan pemantauan karbon, konservasi keanekaragaman hayati, serta pertanian dan mata pencaharian yang berkelanjutan. Penyerapan produk penelitian membutuhkan keterlibatan pengguna akhir yang berarti, sehingga bagian ini juga merinci proses saat ini dan di masa depan yang digunakan proyek untuk memastikan penyerapan hasil penelitian oleh pengguna. Keterlibatan mitra PANGEA secara dini, intensif, dan beragam selama fase pelingkupan untuk desain bersama merupakan hal yang sangat penting untuk memastikan penyerapan dan penggunaan produk data. Keterlibatan pengguna akhir potensial di berbagai forum seperti Biodiversity COP 16 di Kolombia telah menunjukkan ketertarikan terhadap produk PANGEA dari berbagai pengguna akhir potensial, termasuk sektor swasta, pemerintah, LSM, dan akademisi. Berdasarkan umpan balik dari fase pelingkupan (lihat *Lampiran C dan F*), produk data PANGEA akan sangat mudah diakses dan mudah digunakan, dan akan mencakup informasi mengenai pendekatan penskalaan, menawarkan materi pendidikan, dan melanjutkan dialog dua arah untuk meningkatkan kesadaran mengenai PANGEA dan produknya sambil mengumpulkan umpan balik mengenai kebutuhan pengguna. PANGEA berencana untuk memajukan metodologi untuk menggabungkan pengetahuan lokal, tradisional, dan ekologi dengan data penginderaan jarak jauh, yang menawarkan peluang untuk meningkatkan pemahaman ilmiah, dan menggali rute baru untuk menempatkan produk PANGEA di tangan para pengambil keputusan dan pengambil tindakan.

## 9.1 Aplikasi Hasil Penelitian PANGEA

### 9.1.1 Stabilitas Penyerapan Karbon dan Fluks Metana

**Tabel 9.** Aplikasi penelitian PANGEA untuk stabilitas penyerapan karbon dan fluks metana.

GCF-TF: Satuan Tugas Iklim dan Hutan para Gubernur. OSFAC: Observatorium Satelit Hutan Afrika Tengah.

PERTANYAAN SAINS	APLIKASI PENELITIAN	MITRA DAN/ATAU OUTLET POTENSIAL UNTUK DAMPAK
Q1, Q2, Q3, Q8, Q15, Q16, Q18-Q20, Q25, Q27	Memetakan dan mengukur <b>stabilitas jangka panjang penyerapan karbon</b> (yaitu, keabadian di pasar karbon)	U.S. GHG Center, GEO-TREES, CTrees, Land and Carbon Lab (WRI), OSFAC, GCF-TF, Woodwell, SilvaCarbon, IPCC
Q1, Q2, Q3, Q18, Q27	Memetakan dan menghitung <b>prediksi fluks metana</b> tropis	Pusat Gas Rumah Kaca AS, SERVIR, WRI

**Pemetaan dan pemantauan stok dan fluks karbon tropis:** Kegiatan ini sangat penting untuk menutup anggaran karbon global, membatasi proyeksi iklim, dan untuk meningkatkan pengukuran, pelaporan, dan validasi (MRV) kredit karbon. Hal ini membutuhkan perbaikan proyeksi iklim dengan mengurangi

ketidakpastian di sekitar fluks karbon hutan tropis, perubahan penggunaan lahan tropis, dan respon hutan tropis terhadap perubahan iklim. Hasil dari PANGEA dapat meningkatkan pemahaman kita mengenai anggaran karbon, mendukung pasar karbon, dan meningkatkan pemahaman mengenai emisi CH<sub>4</sub>. PANGEA akan berkoordinasi dengan kegiatan Pusat Gas Rumah Kaca Amerika Serikat untuk menentukan bidang-bidang yang selaras dan peluang bagi PANGEA untuk menyumbangkan data dan pemahaman yang dapat memenuhi kebutuhan para pemangku kepentingan (Strategi MMIS GRK Nasional, 2023).

**Memahami kontribusi hutan tropis terhadap anggaran karbon:** Memperbaiki proyeksi perubahan iklim, terutama mengurangi ketidakpastian seputar fluks karbon hutan tropis, perubahan penggunaan lahan tropis, dan respons hutan tropis terhadap perubahan iklim sangat penting berdasarkan laporan Fast Track Action Committee (FTAC) on Climate Services dari National Science and Technology Council (NSTC) pada bulan Maret 2023. Intergovernmental Panel on Climate Change 6th Assessment Report (IPCC AR6) mencatat janji penginderaan jarak jauh untuk meningkatkan akurasi estimasi karbon hutan, namun menyebutkan ketidakpastian dalam estimasi dari pengamatan bumi sebagai kekurangan yang signifikan ([IPCC AR6](#)). PANGEA menawarkan kesempatan untuk secara langsung mengatasi keterbatasan ini dengan, sebagai contoh, memberikan jawaban atas Pertanyaan Sains 2, 3, 8, 13, 14, dan 25-27 kepada Kelompok Kerja IPCC III selama penyusunan laporan kajian ketujuh dan kedelapan, yang dapat mengurangi ketidakpastian dan meningkatkan estimasi karbon.

**Meningkatkan pasar pendanaan karbon:** Pendekatan pendanaan karbon telah mendapatkan popularitas di seluruh masyarakat tropis dan melibatkan entitas pencemar yang mentransfer pembayaran kepada pemerintah daerah dan masyarakat untuk berbagai remediasi emisi karbon, termasuk perlindungan hutan, reboisasi, peningkatan pengelolaan hutan, dan pembangunan hutan tanaman (Anderegg et al., 2020; Morita & Matsumoto, 2023). Namun, pasar karbon terkendala oleh kurangnya kepercayaan terhadap metode yang digunakan, biaya pemantauan yang tinggi, dan meningkatnya kekhawatiran terkait keberlangsungan pasar karbon dalam jangka panjang (Anderegg et al., 2020; Pan et al., 2024). Kemajuan PANGEA dalam pemahaman berbasis proses, pemetaan stok dan fluks karbon tropis, serta prediksi model eksplisit spasial yang dibatasi oleh batasan ruang dari penyerap lahan tropis di masa depan dapat secara langsung mendukung perangkat untuk memetakan dan mengukur stabilitas jangka panjang penyerapan karbon hutan tropis, termasuk

- Berkolaborasi dengan GATC untuk memungkinkan masyarakat lokal dan masyarakat adat menggabungkan temuan PANGEA mengenai fluks karbon di wilayah mereka dengan pemantauan masyarakat terhadap perubahan lahan untuk memperkirakan penyerapan karbon untuk validasi dan pemasaran kredit;
- Bermitra dengan Governors' Climate and Forests Task Force (GCF-TF) untuk mendukung implementasi Cetak Biru Ekonomi Hutan Baru dengan menyediakan stok karbon, fluks, dan data keanekaragaman hayati yang saling berhubungan untuk menilai dampak dari strategi dekarbonisasi yurisdiksi; dan
- Bekerja sama dengan Forest Stewardship Council (FSC) untuk memanfaatkan temuan-temuan PANGEA dan metode-metode yang berkembang dalam hal stok karbon hutan dan respons fluks terhadap perubahan iklim dan interaksi tanaman-hewan dalam mengembangkan sistem pendukung keputusan yang akan membantu para pemegang sertifikat dalam memitigasi dampak iklim terhadap kehutanan di wilayah tropis dan mengelola hutan secara lebih efektif untuk mendapatkan hasil gabungan dari penyerapan karbon dan konservasi keanekaragaman hayati.

**Memetakan dan mengukur prediksi fluks metana:** Ketidakpastian dalam memprediksi emisi metana di masa depan dari daerah tropis dapat menyebabkan prediksi iklim global yang tidak akurat, sehingga menyulitkan kita untuk menilai cakupan dampak perubahan iklim secara menyeluruh. Dengan meningkatkan pemahaman kita tentang fluks metana tropis, kita dapat menyempurnakan anggaran karbon global, mengantisipasi perubahan iklim di masa depan dengan lebih baik, dan menginformasikan strategi mitigasi yang lebih efektif untuk mengekang emisi gas rumah kaca. PANGEA akan memajukan kemampuan pemantauan fluks metana tropis alami dan antropogenik dengan menggunakan penginderaan jarak jauh satelit yang selaras dengan kebutuhan dan kegiatan yang muncul dari Pusat Gas Rumah Kaca AS. Upaya ini akan dilakukan melalui kerja sama dengan mitra seperti pusat regional SERVIR dan Laboratorium Tanah dan Karbon yang dipimpin oleh World Resources Institute untuk memajukan kemampuan mulai dari keahlian teknis lokal hingga pemetaan global dan aplikasi pemantauan.

### 9.1.2 Konservasi Keanekaragaman Hayati

**Tabel 10.** Aplikasi penelitian PANGEA untuk konservasi keanekaragaman hayati.

PERTANYAAN SAINS	APLIKASI PENELITIAN	MITRA DAN/ATAU OUTLET POTENSIAL UNTUK DAMPAK
Q5, Q6, Q7, Q10, Q11, Q12, Q13, Q17	Pemetaan keanekaragaman hayati untuk mendukung <b>konektivitas lanskap</b> dan <b>implementasi koridor</b> serta <b>restorasi hutan tropis</b> (selaras dengan Atlas Ekosistem)	Alexander von Humboldt Biological Resources Research Institute, Alliance Bioversity CIAT, OSFAC, Conservation International, European Space Agency, IUCN Regional Offices, AFR100
Q5, Q6, Q10, Q11, Q12, Q13, Q17, Q23-24, Q26, Q28,	Memberdayakan dan mengangkat masyarakat adat, lokal, dan tradisional melalui <b>integrasi IEK, LEK, dan TEK dengan penginderaan jauh</b>	NASA Indigenous Peoples Initiative, Aliansi Global Masyarakat Teritorial, Inisiatif Hak dan Sumber Daya, Congo Basin Institute School for Indigenous and Local Knowledge, MapBiomass, Woodwell Climate Research Center

Target pertama dari Kerangka Kerja Keanekaragaman Hayati Global 2030 adalah "Merencanakan dan Mengelola Semua Area Untuk Mengurangi Kehilangan Keanekaragaman Hayati" dengan tetap menghormati hak-hak masyarakat adat dan komunitas lokal (CBD, 2030). Untuk mewujudkan hal tersebut, diperlukan proyek berskala PANGEA. Target 2 dan 3 adalah memulihkan 30% dari semua ekosistem yang terdegradasi, dan melestarikan 30% dari seluruh daratan, air, dan laut. Namun, kelangkaan data dan masalah kualitas telah membatasi kemampuan untuk menilai kemajuan terhadap target-target ini ([Penilaian Deklarasi Hutan](#), 2024). PANGEA akan mendukung konservasi keanekaragaman hayati dengan tiga cara:

**Peningkatan pemahaman tentang keanekaragaman hayati:** PANGEA akan memajukan pemahaman keanekaragaman hayati di berbagai skala. Upaya Atlas Ekosistem Global Group on Earth Observations (GEO), yang didukung oleh Konvensi Keanekaragaman Hayati (CBD) dan Konvensi Kerangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim (UNFCCC), berupaya menyatukan peta-peta ekosistem global, regional, dan nasional yang berkualitas tinggi ke dalam sebuah sumber daya daring yang tunggal dan terbuka. Global Ecosystem Atlas memprioritaskan pemetaan "struktur dan fungsi ekosistem dunia dengan detail yang belum pernah ada sebelumnya." **PANGEA akan mengisi kesenjangan kalibrasi dan validasi data utama dalam bioma yang paling beragam di Bumi dan akan secara langsung mendukung upaya ini melalui kolaborasi dengan U.S. Geological Survey (USGS), Badan Antariksa**

**Eropa (ESA), Persatuan Internasional untuk Konservasi Alam (IUCN), Institut Penelitian Sistem Lingkungan, Inc (ESRI), dan lainnya.** Selain itu, PANGEA akan mengkatalisasi penginderaan jarak jauh NASA terhadap Variabel Keanekaragaman Hayati Esensial (EBV) seperti dampak biologis kebakaran dan genangan air yang tidak teratur untuk mengatasi kesenjangan data dengan prioritas tinggi yang diidentifikasi oleh Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network (GEO BON; Skidmore dkk, 2021). PANGEA memahami bahwa menjalin sumber pengetahuan yang beragam dapat meningkatkan pemahaman secara keseluruhan dan secara khusus akan memprioritaskan keterlibatan dengan aliansi dan organisasi Masyarakat Adat dan Masyarakat Lokal untuk memberdayakan dan mengangkat masyarakat adat, lokal, dan tradisional melalui **integrasi pengetahuan adat, lokal, dan tradisional (IEK, LEK, TEK) dengan** penginderaan **jarak jauh**. PANGEA akan mendukung upaya yang diprakarsai dan dipimpin oleh Global Alliance of Territorial Communities (GATC), yang gerakan perempuannya telah melakukan pelatihan pengumpulan data melalui drone, dan Rights and Resources Initiative (RRI), yang telah bermitra dengan Woodwell di masa lalu untuk mengukur dan memperkirakan karbon yang tersimpan di lahan masyarakat adat, keturunan Afro, dan masyarakat setempat ([Ringkasan Kebijakan](#), [Laporan Penelitian](#)). Terdapat minat yang kuat terhadap inisiatif serupa yang menekankan keanekaragaman hayati.

**Memfasilitasi tindakan konservasi keanekaragaman hayati:** Konservasi keanekaragaman hayati dapat mencapai kemajuan yang cukup besar dengan pengamatan berskala besar di seluruh gradien gangguan. Sebagai contoh, PANGEA dapat bekerja sama dengan badan koordinasi lingkungan regional Cekungan Kongo, Komisi Hutan Afrika Tengah (COMIFAC), dan kantor penginderaan jarak jauh regionalnya, OSFAC, untuk menyediakan peta terbaru mengenai kemungkinan respons hutan terhadap perubahan iklim, yang akan memungkinkan perencanaan penggunaan lahan mengidentifikasi koridor satwa liar bernilai tinggi yang potensial untuk konservasi lintas batas. Pengguna di lapangan seperti Pusat Penelitian Ilmiah dan Teknologi Nasional Gabon (CENAREST), Kementerian Hutan dan Fauna Kamerun (MINFOP), dan Institut Konservasi Alam Kongo (ICCN) dapat menggunakan perangkat, data, dan wawasan ini untuk memandu dan memonitor kegiatan konservasi. Demikian pula, upaya restorasi hutan membutuhkan pemahaman yang lebih baik mengenai interaksi tumbuhan-hewan, termasuk spesies apa yang dapat secara efektif mendukung upaya restorasi dan di mana. Dengan menjawab Pertanyaan Sains 10-13, 18, dan 27, PANGEA akan menggambarkan proses kompleks yang menopang pertumbuhan kembali bentang alam hutan tropis. Hasil ini dapat dibagikan kepada berbagai inisiatif penanaman pohon di seluruh wilayah tropis untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensinya. Pekerjaan ini sangat penting bagi upaya-upaya seperti AFR100, Inisiatif Pemulihan Bentang Alam Hutan Afrika untuk memulihkan lahan terdegradasi dan terdeforestasi di Afrika, dan 30x30.

**Memantau dan meningkatkan upaya konservasi keanekaragaman hayati:** Selain itu, kemitraan dengan kolaborator utama yang diidentifikasi dalam studi pelingkupan akan mempercepat pemantauan keanekaragaman hayati dan pengembangan platform pengguna. Sebagai contoh, munculnya upaya pengelolaan lahan yang inovatif seperti Tindakan Konservasi Efektif Lainnya (Other Effective Conservation Measures/ OECMs) menawarkan harapan untuk mencapai tujuan internasional seperti 30x30, tetapi dampak dari jenis pengelolaan baru ini terhadap keanekaragaman hayati belum diketahui. Organisasi seperti IUCN dan Campaign for Nature dapat menggunakan data dan metodologi PANGEA yang dapat meningkatkan penilaian dan identifikasi perubahan penggunaan lahan untuk menilai keefektifan OECM sebagai alat konservasi keanekaragaman hayati. Demikian pula, PANGEA dapat bermitra dengan inisiatif pendanaan alam seperti Fund for the Amazon dan Tropical Forests Forever Fund untuk mengembangkan pendekatan yang komprehensif dan berbiaya rendah untuk memantau apakah pendanaan mereka berdampak pada keanekaragaman hayati.

### 9.1.3 Pertanian dan Mata Pencarian Berkelanjutan

**Tabel 11.** Aplikasi penelitian PANGEA untuk pertanian dan mata pencarian yang berkelanjutan.

PERTANYAAN SAINS	APLIKASI PENELITIAN	MITRA DAN/ATAU OUTLET POTENSIAL UNTUK DAMPAK
Q6, Q9, Q14, Q17	Mengintensifkan <b>produksi pertanian</b> dan meningkatkan hasil panen	SERVIR, IITA, NASA Harvest, Land and Carbon Lab (WRI)
Q14, Q16, Q17, Q19	Memajukan <b>produksi pertanian yang berkelanjutan</b> , termasuk pengaruh iklim	SERVIR, IITA, Alliance Bioversity & CIAT
Q3, Q16, Q19	Meningkatkan <b>ketertelusuran rantai pasokan</b> komoditas pertanian	Aliansi Bioversity & CIAT, WRI, sektor swasta, lembaga sertifikasi, regulator
Q3, Q8, Q14, Q15, Q16, Q27	Meningkatkan <b>peringatan &amp; respons bencana</b> (misalnya, kebakaran, banjir, kekeringan)	SERVIR, IITA, Alliance Biodiversity & CIAT, MapBiomass, Observatorium Nasional Kamerun untuk Perubahan Iklim

Ekosistem tropis merupakan rumah bagi 3 miliar orang dan menghasilkan komoditas pertanian yang diekspor dan dikonsumsi secara global. Mengidentifikasi alternatif bioekonomi untuk produksi pertanian sekaligus mengintensifkan pertanian di wilayah tropis, menjadikannya lebih berkelanjutan dan tahan terhadap perubahan iklim, dan meningkatkan kemampuan untuk melacak komoditas pertanian hingga ke daerah asalnya, merupakan hal yang sangat penting untuk mengurangi tekanan deforestasi terhadap hutan tropis sekaligus memenuhi permintaan global yang terus meningkat. PANGEA akan mendukung upaya-upaya ini dengan cara-cara berikut:

**Peningkatan intensifikasi:** Pemantauan tanaman melalui satelit menawarkan kemungkinan untuk menilai tingkat produksi secara hampir seketika, membandingkan area intervensi dan kontrol dalam jarak yang jauh untuk memberikan data penting mengenai keberhasilan upaya intensifikasi dan mendukung pengambilan keputusan petani. Di Lembah Kongo, di mana sebagian besar lahan pertanian berukuran kecil, diselingi mosaik hutan, dan sulit dijangkau, penginderaan jarak jauh dapat membantu memahami penetrasi metode dan teknologi baru dari jarak jauh. PANGEA akan memajukan kapasitas penggunaan penginderaan jauh satelit untuk pertanian presisi di daerah tropis, termasuk pemetaan jenis tanaman yang lebih baik, pemetaan efisiensi penggunaan hara dan air, dan estimasi hasil panen. Pekerjaan ini akan dilakukan melalui kerja sama dengan mitra-mitra utama yang bekerja di bidang ini, termasuk bekerja sama dengan World Resources Institute (WRI) untuk mendukung Laboratorium Tanah dan Karbon.

**Peningkatan keberlanjutan dan kapasitas untuk beradaptasi:** Pertanian di bawah perubahan iklim akan mengharuskan petani untuk menanam lebih banyak makanan dalam keadaan yang semakin tidak dapat diprediksi, termasuk pergeseran pola curah hujan dan periode panas yang intens. Sebagai kontributor utama perubahan iklim, ada juga gerakan untuk membuat pertanian lebih berkelanjutan, melalui pengurangan penggunaan pupuk dan pestisida, pembatasan penggunaan air, dan peningkatan upaya pengendalian erosi berdasarkan penginderaan jarak jauh terhadap kebutuhan tanaman. "Pertanian presisi" seperti ini sudah umum dilakukan di Amerika Serikat, namun masih kurang di sebagian besar wilayah tropis karena data dan metode yang mendasarinya belum lengkap. PANGEA akan bekerja sama dengan rekan-rekan dari International Institute for Tropical Agriculture (IITA), Alliance Bioversity-CIAT, dan International Water Management Institute (IWMI) untuk

mengembangkan dan menggunakan teknik-teknik seperti pemantauan kesehatan tanaman berskala pertanian secara spasial yang memungkinkan organisasi-organisasi tersebut untuk mengidentifikasi ancaman terhadap ketahanan pangan dengan cepat dan meresponsnya dengan langkah-langkah mitigasi.

**Ketertelusuran yang lebih baik:** Terdapat peningkatan permintaan secara global untuk menghubungkan komoditas pertanian dengan lahan pertanian tempat komoditas tersebut ditanam, yang didorong oleh permintaan konsumen dan tekanan regulasi dari rezim kebijakan baru seperti Peraturan Komoditas Bebas Deforestasi Uni Eropa (EUDR) dan rancangan undang-undang serupa yang sedang dipertimbangkan di A.S. PANGEA akan memungkinkan penggunaan sensor-sensor baru seperti NISAR, BIOMASSA, dan SBG untuk mendeteksi berbagai bentuk perluasan lahan pertanian ke dalam hutan tropis, yang akan memudahkan perusahaan komoditas pertanian untuk menilai dampak perubahan tata guna lahan pada rantai nilai mereka. Perusahaan seperti Satelligence akan menggunakan data dari PANGEA untuk menunjukkan kepatuhan terhadap EUDR untuk beberapa perusahaan makanan terbesar di dunia. Peningkatan metodologis dari akuisisi data PANGEA juga dapat meningkatkan kemampuan kita untuk menggunakan alat penginderaan jauh untuk membedakan antara wanatani yang kompleks dan hutan sekunder, yang saat ini merupakan kesenjangan utama yang merusak kemampuan untuk mengenali dan memetakan perkebunan kopi dan kakao yang menggunakan metode penanaman yang lebih berkelanjutan. PANGEA akan bekerja sama dengan mitra seperti Alliance Bioversity CIAT untuk menerapkan perbaikan ini untuk membantu petani dan koperasi petani menunjukkan kepatuhan dan memasarkan produk yang bernilai tinggi. Kegiatan-kegiatan ini juga memposisikan PANGEA untuk memberikan dampak pada sektor mata pencaharian lainnya, seperti pembayaran jasa ekosistem, bioekonomi, dan hasil hutan non-kayu.

**Peringatan dan respons bencana yang lebih baik:** Kekeringan, banjir, hama, dan panas yang ekstrem mengancam produksi pertanian di daerah tropis. Di tempat-tempat di mana adaptasi pertanian terhadap perubahan iklim tidak memadai, kebijakan dan praktik seperti sistem peringatan dini, peringatan bencana, dan produk asuransi yang lebih baik untuk petani kecil menjadi sangat penting. Upaya PANGEA untuk memetakan aktivitas penggunaan lahan dan perubahan penggunaan lahan, memahami dampak iklim terhadap fenologi, dan memperkirakan konsentrasi hara tanaman dari jarak jauh, semuanya akan mendukung solusi kebijakan ini. Sebagai contoh, penginderaan jarak jauh yang lebih baik untuk batas-batas lahan pertanian, jenis tanaman, dan hasil panen pada skala lapangan akan menurunkan biaya pemantauan untuk produk asuransi berbasis iklim bagi petani kecil.

Untuk mewujudkan potensi keuntungan bagi ketahanan pangan dan mata pencaharian, PANGEA telah melibatkan mitra penelitian pertanian seperti NASA Harvest, SERVIR, Kelompok Konsultatif untuk Penelitian Pertanian Internasional (CGIAR), termasuk IITA, dan mitra yang bekerja di titik temu antara hutan dan pertanian, termasuk CIAT, Institut Sumber Daya Dunia, serta Pusat Penelitian Kehutanan Internasional dan Agroforestri Dunia (CIFOR-ICRAF). Informasi yang disampaikan oleh para mitra ini selama proses pelingkupan PANGEA secara langsung menginformasikan pertanyaan-pertanyaan ilmiah PANGEA untuk meningkatkan potensi hasil Aksi Bumi. Mitra seperti IITA dan CIAT memiliki spesialisasi dalam menerjemahkan temuan-temuan dari penelitian ke dalam praktik dan membangun pengalaman selama puluhan tahun dengan mitra sektor swasta dan pemerintah.

## 9.2 Proses untuk Memungkinkan Ilmu Pengetahuan Bumi Beraksi

### 9.2.1 Keterlibatan Pengguna

Ketertarikan substantif saja tidak cukup untuk menjamin bahwa produk NASA akan digunakan. Aplikasi penelitian yang efektif mengharuskan komunitas pengguna akhir diidentifikasi dan dilibatkan lebih awal dan harus menjadi mitra dalam desain penelitian dan pengembangan alat. Hal ini membutuhkan perencanaan, niat, dan sumber daya yang matang. Itulah sebabnya PANGEA telah berinvestasi sejak awal fase pelingkupan dalam meletakkan dasar untuk penerjemahan penelitian. Secara khusus, PANGEA membahas Prinsip-Prinsip Panduan dari Strategi ES2A NASA (2024-2034) berikut ini:

- **Memperkuat dampak melalui kemitraan:** Investasi PANGEA dalam pelibatan masyarakat telah menarik beragam mitra, termasuk pemerintah internasional, donor, dan masyarakat lokal (lihat *Bagian 8* untuk rincian tentang pelibatan masyarakat). Mitra-mitra ini termasuk pengguna potensial, kontributor data, dan penyandang dana potensial untuk aplikasi yang terakhir ini akan membantu mengefektifkan biaya kerja PANGEA dengan melengkapi sumber daya Ilmu Pengetahuan Bumi NASA dengan dana untuk mendukung peningkatan kapasitas, pelibatan masyarakat, dan penerjemahan penelitian (lihat *Bagian 10.2, Peluang Pendanaan Bersama*, untuk informasi lebih lanjut). PANGEA juga membawa kemitraan internasional yang luas, mulai dari badan antariksa nasional yang dapat memberikan data pelengkap hingga masyarakat tropis yang akan berpartisipasi dalam pengumpulan data dan berpotensi dalam penggunaan dan tindakan. PANGEA melibatkan para mitra ini di awal proses untuk meningkatkan investasi dan masukan mereka dalam pengembangan bersama produk akhir yang potensial.
- **Melibatkan tenaga kerja yang beragam dan komunitas Ilmu Pengetahuan Bumi yang lebih luas:** Tujuan transdisipliner PANGEA didukung oleh tim yang beragam, mulai dari ilmuwan data hingga ekonom, dan berasal dari NASA, akademisi, organisasi nirlaba, lembaga federal lainnya, dan pemerintah dari seluruh dunia. Keterlibatan internasional PANGEA yang luas juga menawarkan peluang untuk bekerja dengan dan merekrut para pemikir terbaik di seluruh dunia dalam upaya Ilmu Pengetahuan Bumi NASA, sementara upaya peningkatan kapasitas dan pelatihan (lihat *Bagian 7*) membantu mempersiapkan generasi ilmuwan berikutnya.

Selama Fase Pelingkupan, PANGEA memimpin penjangkauan ekstensif kepada pengguna potensial (lihat *Lampiran B*), dan terlibat dengan pengguna potensial mengenai pertanyaan dan data apa yang paling berharga bagi mereka. Hasilnya, PANGEA telah bekerja sejak awal untuk menjembatani kesenjangan yang sulit antara pertanyaan sains yang diajukan dan apa yang dibutuhkan pengguna akhir untuk pengambilan keputusan. Keterlibatan masyarakat merupakan inti dari strategi ES2A PANGEA (lihat *Bagian 8* untuk rincian tentang bagaimana PANGEA akan melibatkan masyarakat). Kami menyadari bahwa pelibatan masyarakat memiliki risiko menciptakan ekspektasi yang tidak dapat dipenuhi oleh proyek, sebagian besar karena data dari udara yang dikumpulkan memiliki ruang lingkup spasial terbatas dan akan lebih bersifat episodik daripada yang dibutuhkan untuk memenuhi banyak aplikasi pengguna dan kebutuhan pengambilan keputusan. PANGEA akan melakukan segala upaya untuk berulang kali dan dengan jelas menyampaikan keterbatasan data proyek, yang tentu saja terbatas secara spasial dan temporal. PANGEA juga akan berusaha untuk memanfaatkan momentum yang diciptakan oleh periode proyek yang singkat namun intens untuk menciptakan, menumbuhkan, dan memperkuat komunitas pengguna yang baru dan lebih beragam untuk data Bumi NASA. Kedalaman dan jangkauan keterlibatan PANGEA akan bergantung pada pendanaan dan merupakan prioritas dalam peluang pendanaan bersama.

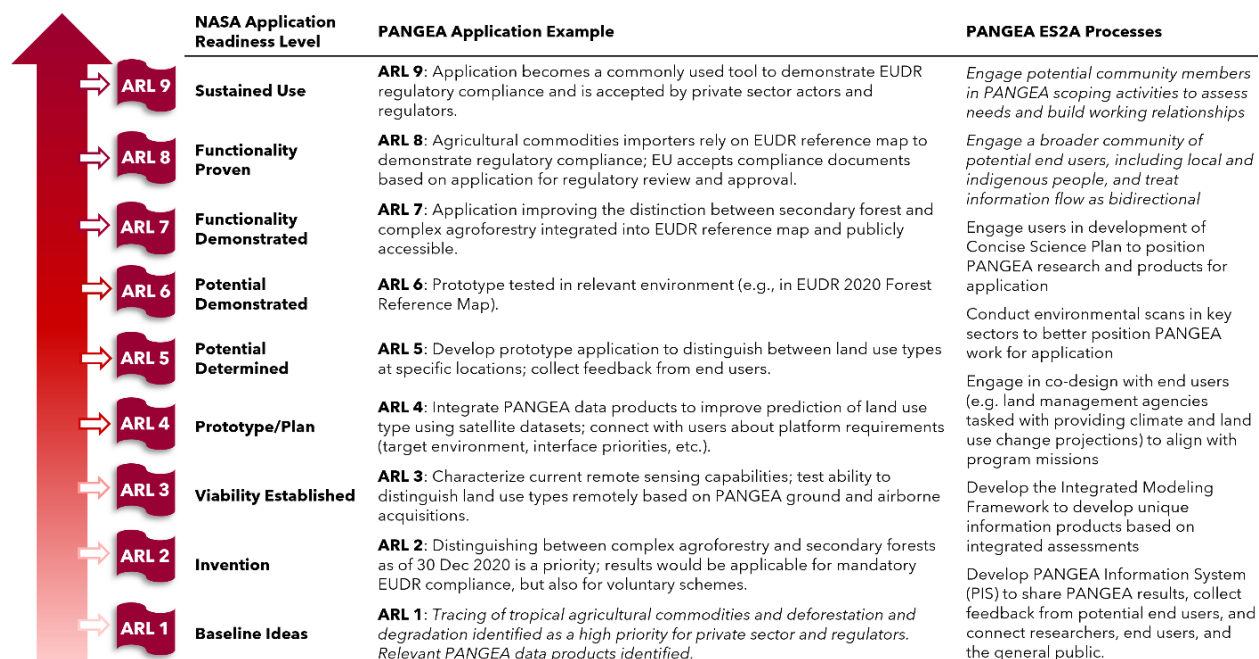
Secara khusus, PANGEA akan memastikan bahwa semua kegiatan pelibatan masyarakat menekankan hubungan antara data lapangan dan data dari udara yang dimiliki PANGEA dengan sensor satelit Observatorium Bumi NASA (baik yang sedang berjalan maupun yang direncanakan). Karena pengguna akan mendapatkan manfaat dari produk yang berasal dari pengamatan ruang angkasa, prioritas PANGEA ES2A berfokus pada memajukan kebutuhan dan kemampuan pemantauan spesifik yang menggunakan layanan yang sedang berlangsung, yaitu misi satelit (lihat *Lampiran D*). Data kampanye udara akan mendukung pelatihan mitra yang berfokus pada data operasional sebelum, bersamaan dengan, dan setelah peningkatan skala PANGEA dapat digunakan untuk mengambil produk turunan satelit. Contohnya termasuk pelatihan dan kesiapan SAR dan hiperspektral yang berkolaborasi dengan SERVIR. Dengan demikian, PANGEA akan membangun komunitas pengguna awal NISAR dan SBG di daerah tropis.

PANGEA juga memprioritaskan untuk mencari mitra pendanaan yang beragam, dengan menyadari bahwa NASA sangat cocok untuk mendukung pengumpulan data, analisis, dan pengembangan alat/platform, sementara sponsor lain memiliki posisi yang lebih baik untuk mendukung proyek-proyek konservasi yang menggunakan data dan bentuk-bentuk pelatihan serta pengembangan kapasitas yang spesifik untuk aplikasi. Fase Pelingkupan juga mencakup latihan visioning, di mana berbagai tim berkolaborasi untuk menggambar jalur translasi yang mencakup akuisisi data, kasus penggunaan potensial, pengembangan bersama produk, dan identifikasi mitra.

## 9.2.2 Aplikasi Pendukung Penelitian PANGEA

PANGEA akan memanfaatkan keterlibatan mitra yang sudah ada dan yang direncanakan untuk mengintegrasikan ES2A secara holistik ke dalam proyek. Hal ini termasuk melakukan penilaian kebutuhan pengguna sebagai bagian dari Rencana Percobaan Ringkas dan melakukan pemindaian lingkungan untuk mengidentifikasi alat yang ada yang dapat mengintegrasikan data. Hal ini sangat penting karena integrasi ke dalam perangkat yang sudah ada biasanya meningkatkan kemungkinan penyerapan, penggunaan, dan pemeliharaan dalam jangka panjang. **Gambar 20** menunjukkan pendekatan PANGEA untuk memajukan hasil melalui Tingkat Kesiapan Aplikasi (ARL) NASA, yang akan bergantung pada penggabungan penyelarasan materi pelajaran yang kuat dengan keterlibatan mitra yang bijaksana, dini, dan inklusif. Meskipun contoh ini ditampilkan sebagai proses linier menggunakan kerangka kerja ARL NASA, PANGEA mengharapkan kegiatan ES2A kami bersifat berulang, dan terkadang non-linier, yang mewakili kompleksitas yang mendefinisikan kebijakan dan pengambilan keputusan di dunia nyata.

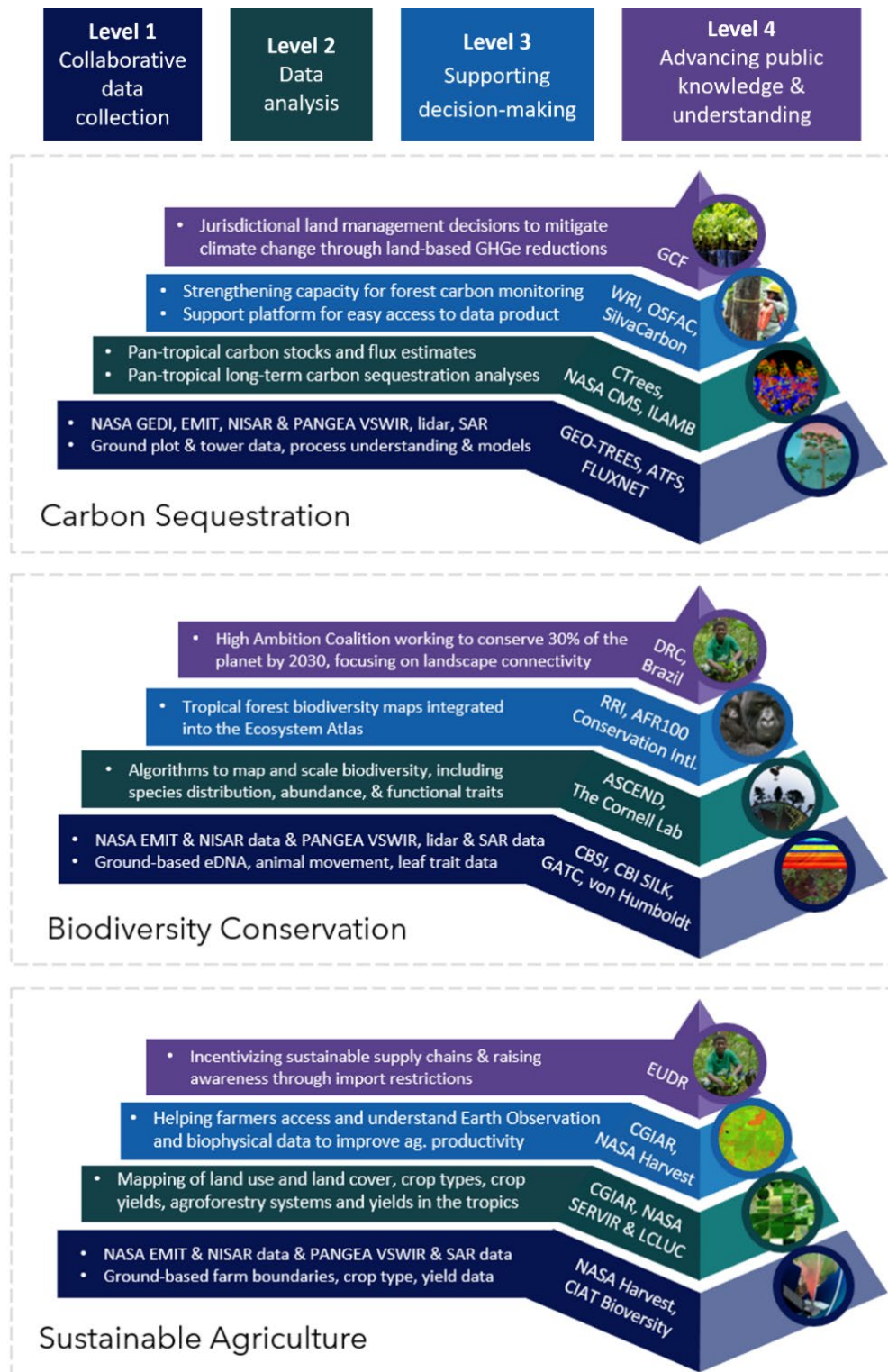
NASA, bersama dengan lembaga-lembaga domestik dan internasional lainnya, semakin memainkan peran utama dalam pengembangan dan implementasi sistem pendukung keputusan. Sistem-sistem ini dirancang untuk menggabungkan hasil-hasil dari kegiatan penelitian dalam suatu kerangka kerja pemodelan untuk memberikan informasi kepada para pengelola lahan, pemerintah daerah dan nasional, serta pihak-pihak lain yang membutuhkan informasi dalam konteks tertentu. Portal Informasi PANGEA (PIP) akan menyediakan platform untuk melakukan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan produk informasi satelit untuk mendukung pengambilan keputusan. Portal ini akan menjadi platform penting bagi para peneliti PANGEA untuk berinteraksi di berbagai tingkatan dengan para ilmuwan dan manajer di berbagai lembaga yang bertanggung jawab dalam menilai dampak perubahan iklim di wilayah tropis, serta media dan masyarakat umum. Kerangka Kerja Pemodelan Terpadu PANGEA akan menyediakan perancah lain untuk kegiatan ES2A dengan menciptakan produk informasi yang unik berdasarkan penilaian terpadu.



**Gambar 20.** Contoh strategi Tingkat Kesiapan Penerapan untuk PANGAEA yang difokuskan pada dukungan terhadap Peraturan Deforestasi Uni Eropa (EUDR). Peraturan serupa sedang dipertimbangkan di Amerika Serikat.

Terdapat peningkatan pengakuan dari NASA dan lembaga-lembaga Amerika Serikat dan internasional lainnya mengenai perlunya mengembangkan sistem pendukung keputusan bersama untuk bertukar informasi dan analisis dengan para pengelola lahan, pemerintah, serta pengambil kebijakan dan keputusan lainnya. PANGAEA akan mengembangkan produk bersama dengan para mitra yang bertanggung jawab atas penyediaan data yang diperlukan untuk pemantauan perubahan iklim dan tutupan lahan. Model-model berbasis proses yang akan menjadi fokus penelitian di PANGAEA selaras dengan misi kantor-kantor tersebut. Para peneliti dari kantor-kantor tersebut terlibat dalam proses pelingkupan PANGAEA, dan masukan mereka telah menginformasikan pertanyaan-pertanyaan penelitian dan menyemai ide-ide untuk aplikasi penelitian dari hasil-hasil PANGAEA.

PANGAEA juga menawarkan kesempatan untuk terlibat dalam pekerjaan dan aplikasi transdisipliner, terutama mengingat sifat perubahan iklim, konservasi keanekaragaman hayati, dan produksi pertanian yang saling berkaitan, yang merupakan beberapa aplikasi utama untuk produk PANGAEA. **Gambar 21** menunjukkan potensi tumpang tindih dalam topik-topik ini dan menyoroti sebagian kecil mitra yang telah terlibat dalam pekerjaan di titik temu dari berbagai bidang tersebut.



**Gambar 21.** Contoh implementasi strategi PANGEA Earth Science to Action, dengan fokus pada penyerapan karbon, konservasi keanekaragaman hayati, dan pertanian berkelanjutan serta contoh mitra yang telah terlibat dalam kegiatan terkait.

## 10 Kelayakan Teknis dan Logistik

PANGEA akan memanfaatkan sejarah kampanye lapangan dan udara internasional NASA yang sukses, termasuk kampanye baru-baru ini di Amerika, Afrika, dan Asia. Sejumlah Earth Venture Suborbital (EVS) dan kampanye udara internasional NASA lainnya juga telah menunjukkan kelayakan pesawat NASA dan pesawat yang dikontrak NASA yang dikerahkan secara internasional dengan instrumen penginderaan in situ dan penginderaan jarak jauh untuk mendukung kampanye berskala besar selama beberapa tahun di daerah tropis Amerika. Pada tahun 2023, NASA JPL memiliki kampanye yang sukses dengan AVIRIS-NG yang mengumpulkan data penginderaan jauh dengan pesawat yang dikontrak NASA di atas Chili, Kolombia, dan Ekuador untuk pengambilan sumber titik metana dengan berkoordinasi dengan masing-masing negara. Hal ini merupakan kelanjutan dari kampanye sukses sebelumnya di wilayah tersebut, termasuk, misalnya, penerbangan UAVSAR di Kolombia, Ekuador, Peru, dan Guyana Prancis; penerbangan AVIRIS di Kolombia, Ekuador, dan Chili; dan LVIS di Guyana Prancis. NASA juga telah merencanakan penerbangan AVIRIS di Panama dan Kosta Rika untuk tahun 2025. Selain itu, NASA telah melakukan penelitian ekstensif di Afrika, termasuk SAFARI, AfriSAR-1, AfriSAR-2, dan BioSCape. Saat ini juga terdapat investasi besar di Afrika yang akan mendukung elemen-elemen kelayakan penting dari PANGEA, termasuk Inisiatif Sains Basin Kongo (CBSI), CongoFlux, One Forest Vision, Panel Sains untuk Kongo, African Masters of Machine Intelligence (AMMI) melalui Institut Ilmu Matematika Afrika (AIMS), kolaborasi NASA yang sudah berjalan dengan Badan Antariksa Gabon (AGEOS) dan Observatorium Satelit Hutan Afrika Tengah (OSFAC), dan GEO-TREES. Tim PANGEA telah melakukan kontak dengan Biro Kelautan dan Urusan Lingkungan dan Ilmu Pengetahuan Internasional Departemen Luar Negeri Amerika Serikat, yang dengan antusias mendukung PANGEA dan manfaatnya bagi diplomasi lingkungan dan ilmu pengetahuan.

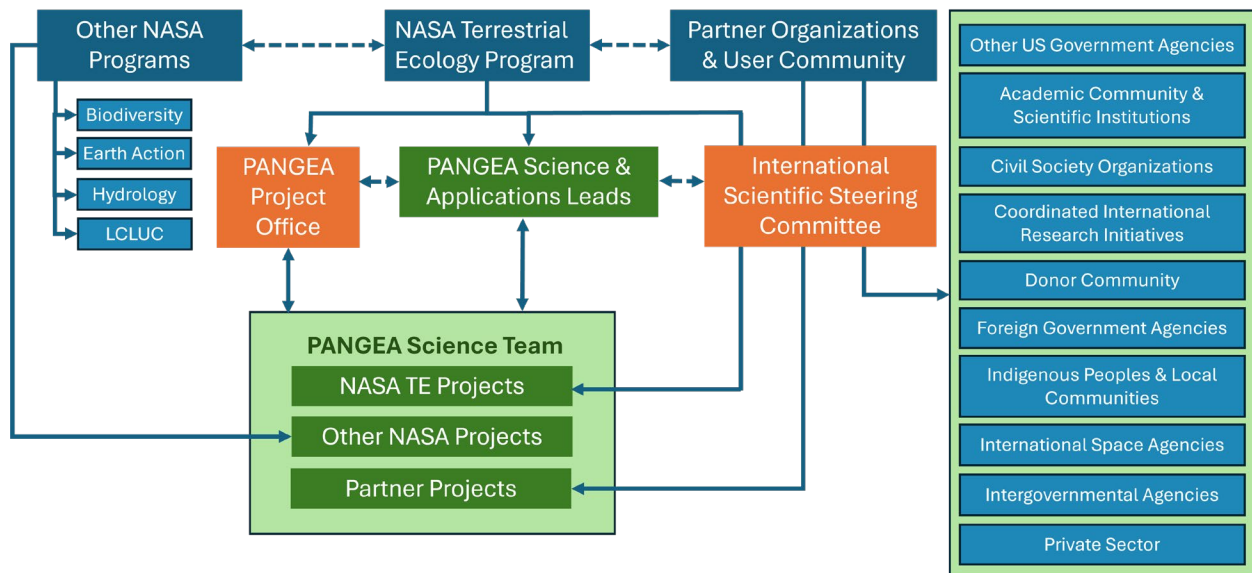
PANGEA akan memerlukan penyebaran internasional yang berpotensi dilakukan di beberapa negara. Tantangan yang diantisipasi meliputi penyebaran dan pemeliharaan instrumentasi in situ, memperoleh izin penerbangan internasional untuk akuisisi data udara, memperoleh visa dan izin penelitian untuk peneliti AS dan internasional, akses ke lokasi lapangan, interaksi/konflik antara manusia dan hewan, kerusakan politik atau keresahan lainnya, dan kesehatan dan keselamatan ilmuwan dan peserta (lihat *Bagian 10.5* untuk *Penilaian Risiko*). Membangun hubungan yang diperlukan untuk mendapatkan izin penerbangan untuk negara-negara terpilih dan lokasi lapangan yang merupakan bagian dari domain PANGEA akan menjadi prioritas awal (lihat *Bagian 6.2.4, Pengamatan Penginderaan Jauh dari Udara*). Untuk mendapatkan izin penerbangan, PANGEA akan bekerja sama dengan NASA OIIR untuk mengembangkan paket izin diplomatik yang diperlukan untuk penyebaran udara internasional. Sebelum meminta izin penerbangan, PANGEA akan bekerja sama dengan NASA dan Departemen Luar Negeri Amerika Serikat untuk membangun hubungan dengan mitra di dalam negeri seperti lembaga pemerintah, LSM, dan pemimpin wilayah adat untuk mengembangkan perjanjian yang akan memastikan izin penerbangan dan izin lapangan yang tepat.

Dalam kasus-kasus di mana pesawat NASA tidak dapat memperoleh izin terbang atau memperoleh data menggunakan instrumentasi sendiri, PANGEA akan mengerahkan aset komersial atau aset lainnya, seperti ALS komersial, instrumentasi berbasis UAV komersial, atau instrumen dan pesawat lokal untuk memperoleh set data udara yang diperlukan. Hal ini sangat penting di Brasil, di mana NASA secara historis mengalami pembatasan untuk pengamatan di darat dengan menggunakan instrumen dan pesawat non-Brasil. PANGEA akan membangun preseden yang digunakan oleh NASA dan pemerintah Amerika Serikat dalam menggunakan penyedia data udara komersial untuk

mengumpulkan set data yang diperlukan (lihat *Bagian 6.2.4, Pengamatan Penginderaan Jauh dari Udara*).

## 10.1 Organisasi dan Manajemen

Organisasi dan koordinasi PANGEA akan ditentukan oleh Manajemen Program NASA. Kami menyajikan konsep untuk organisasi dan manajemen yang mencerminkan model yang berhasil digunakan dalam ABoVE dan LBA-ECO (**Gambar 22**). Struktur ini akan memungkinkan organisasi dan manajemen proyek jangka panjang dengan investasi yang signifikan dari kemitraan transdisipliner dan kolaborasi pada skala nasional dan internasional.



**Gambar 22.** Usulan struktur organisasi PANGEA.

### 10.1.1 Manajemen Program

*Manajemen Program* Ekologi Terestrial NASA akan mengatur dan mengawasi PANGEA dengan dukungan *Kantor Proyek* PANGEA. Mereka akan bekerja di dalam Divisi Ilmu Pengetahuan Bumi NASA untuk memilih dan mendanai proyek-proyek penelitian yang dilakukan oleh *Tim Ilmu Pengetahuan* PANGEA untuk berpartisipasi dalam PANGEA dan untuk mengalokasikan sumber daya ke *Kantor Proyek* PANGEA termasuk *Ilmuwan Proyek* PANGEA dan *Deputi Ilmuwan Proyek* (bersama-sama dengan *Kepemimpinan Ilmiah [SL]*), yang juga dipilih oleh Manajemen Program. Manajemen Program akan bertanggung jawab untuk mewakili kegiatan PANGEA di dalam NASA, termasuk Program NASA lainnya yang dapat mendukung kegiatan PANGEA. Manajemen program akan mengkoordinasikan kegiatan PANGEA dengan mitra penelitian lain dari lembaga dalam dan luar negeri.

### 10.1.2 Kantor Proyek

Implementasi PANGEA akan didukung oleh *Kantor Proyek* yang dipimpin oleh *Manajer Proyek* yang ditunjuk oleh Manajemen Program dan didukung oleh staf proyek. *Ilmuwan Proyek* PANGEA dan *Wakil Ilmuwan Proyek* akan menjadi anggota *ex-officio* dari Kantor Proyek. Kantor Proyek akan (a) mengawasi dan mengelola kegiatan dan proyek penelitian lapangan dan penginderaan jauh PANGEA yang disponsori oleh Program Ekologi Terestrial NASA dan kantor program NASA lainnya; (b) mengoordinasikan dan memberikan dukungan logistik untuk penelitian lapangan dan kampanye penginderaan jauh yang disponsori oleh NASA, termasuk pengawasan keselamatan dan manajemen risiko; (c) memberikan dukungan logistik untuk kelompok kerja dan koordinasi PANGEA, termasuk dukungan untuk pertemuan dan lokakarya; dan (d) mengembangkan dan memelihara Sistem Informasi PANGEA. Kantor Proyek akan melakukan interaksi penting dengan para pemangku kepentingan lokal dan regional dan akan berbagi tanggung jawab atas interaksi tersebut dengan Scientific Leadership. Kantor Proyek akan membantu anggota Tim Ilmuwan dalam pengajuan perizinan kepada pihak yang berwenang. Bergantung pada kebutuhan Tim Ilmuwan, Kantor Proyek juga dapat mengatur pengumpulan data variabel inti dan pemasangan infrastruktur di lokasi lapangan. Kantor Proyek akan bertanggung jawab untuk mengelola kampanye sains dari udara. Anggota Tim Sains akan bekerja sama dengan Kantor Proyek dan mengandalkan panduan dari stafnya untuk kegiatan lapangan, komunikasi dengan pemangku kepentingan dan pihak berwenang di tingkat lokal dan nasional, serta penggunaan infrastruktur siber PANGEA.

PANGEA akan memprioritaskan koordinasi yang erat antara Tim Sains PANGEA dan kegiatan Earth Science to Action. Manajer Proyek akan menunjuk titik kontak (POC) di Kantor Proyek untuk aplikasi sains PANGEA. POC ini akan memantau ekspektasi yang dimiliki oleh mitra aplikasi terhadap Tim Sains PANGEA. Komunikasi yang teratur dan transparan dengan mitra aplikasi potensial akan terus berlanjut di semua tahap PANGEA, dan pembaruan tentang keputusan untuk melanjutkan atau tidak melanjutkan aplikasi potensial akan dikomunikasikan dengan segera. Reputasi internasional NASA bergantung pada kecocokan antara kebutuhan pengguna dengan investasi dan kemampuan NASA, serta mengelola ekspektasi semua mitra.

### 10.1.3 Definisi Sains

Sebelum dimulainya investigasi sains PANGEA, sekelompok ilmuwan dan kepemimpinan ilmiah yang dipilih oleh Kantor Program akan bekerja sama dengan Kantor Proyek untuk merancang *Rencana Eksperimen Ringkas*. Rencana ini akan menyajikan penyempurnaan dari ide-ide yang disajikan dalam dokumen pelingkupan ini. Tujuan dari rencana yang disempurnakan ini adalah untuk mencocokkan cakupan ilmiah dengan sumber daya yang tersedia. Rekomendasi spesifik mengenai lokasi penelitian, kebutuhan infrastruktur ilmiah lapangan (termasuk instrumentasi), dan persyaratan untuk penginderaan jarak jauh dari udara akan ditentukan dalam rencana ringkas tersebut. Rencana Percobaan Ringkas akan memenuhi kebutuhan Manajemen Program untuk meminta penyelidikan ilmiah dan akan melayani Tim Sains terpilih sebagai panduan untuk penyelidikan terpadu mereka untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ilmiah PANGEA.

#### 10.1.4 Implementasi Proyek

Proyek PANGEA akan dilaksanakan oleh Tim Sains PANGEA terpilih yang didukung oleh Kantor Proyek selama enam hingga sembilan tahun seperti yang disebutkan dalam pengumuman NASA A.4 tahun 2022. *Rencana Implementasi* Proyek akan diuraikan berdasarkan Rencana Eksperimen Ringkas. Kantor Proyek akan bertanggung jawab atas Rencana Implementasi termasuk pembaruan rutin, yang frekuensinya akan ditentukan melalui konsultasi dengan Tim Ilmu Pengetahuan dan Manajemen Program. Rencana implementasi harus merinci kegiatan penelitian yang akan dilakukan dan menetapkan peran dan tanggung jawab untuk peneliti yang terlibat dalam kegiatan tersebut selama pelaksanaan PANGEA. Jadwal pelaksanaan proyek disajikan pada *Bagian 10.4 (Tabel 14)*. Pada awal proyek, sekitar satu tahun akan dihabiskan untuk mempersiapkan kegiatan pengumpulan data di lapangan dan udara. Periode utama pengumpulan data akan berlangsung selama tiga hingga enam tahun tergantung pada durasi dan cakupan proyek secara keseluruhan. Analisis data yang dikumpulkan akan terus dilakukan selama proyek berlangsung. Kami berharap pengumpulan data akan berakhir secara bertahap dalam waktu satu hingga tiga tahun sebelum proyek berakhir untuk memberikan waktu bagi analisis, integrasi, dan sintesis data. PANGEA akan meninggalkan warisan data dan ilmu pengetahuan terbuka yang akan mendukung investigasi ilmiah di masa depan yang akan menjawab pertanyaan-pertanyaan ilmiah PANGEA dan tema-tema ilmu pengetahuan yang baru.

#### 10.1.5 Tim Sains dan Kepemimpinan Sains

-*Tim Ilmu Pengetahuan*, yang dipimpin oleh Ilmuwan Proyek dan Wakil Ilmuwan Proyek, akan terdiri dari Peneliti Utama (PI) dan Peneliti Pendamping (Co-I) dari penelitian terpilih, serta ilmuwan yang direkrut oleh PI dan Co-I, termasuk ilmuwan dan mahasiswa pascadoktoral. Dalam koordinasi yang erat dengan Tim Sains PANGEA, Kantor Proyek, dan Manajemen Program, Ilmuwan dan Deputi Proyek akan memanggil dan mengatur agenda untuk pertemuan rutin Tim Sains PANGEA. Tim Ilmuwan akan bertemu secara teratur, secara nominal dengan satu pertemuan tatap muka setiap tahunnya. Untuk pertemuan virtual, PANGEA akan berusaha untuk mengatur pertemuan dengan mempertimbangkan zona waktu orang-orang yang diwakili. Pertemuan-pertemuan ini akan memajukan perencanaan Tim Sains, pertukaran hasil awal, dan sangat memudahkan interaksi di antara para peserta proyek. Pertemuan-pertemuan ini merupakan kesempatan yang sangat penting bagi para mahasiswa dan ilmuwan pascadoktoral untuk bertemu dengan para ilmuwan senior dari proyek-proyek lain. Tempat pertemuan akan dipilih untuk memfasilitasi perjalanan dan untuk meminimalkan komplikasi yang terkait dengan mendapatkan visa. Ilmuwan Proyek dan Deputi akan bertemu dengan Manajemen Program dan manajemen Kantor Proyek, minimal setiap tiga bulan, untuk meninjau kemajuan, menyelesaikan masalah, dan mendiskusikan langkah-langkah implementasi selanjutnya.

Pengalaman dengan proyek-proyek sebelumnya memberi tahu kami bahwa komunikasi yang tepat waktu sangat penting untuk mengelola ekspektasi Tim Sains PANGEA dan para peneliti dari proyek-proyek dan organisasi mitra. Science Leadership (SL) PANGEA akan mengkomunikasikan tujuan dan hasil penelitian dari Tim Sains yang didanai NASA kepada berbagai audiens. SL akan bekerja sama dengan mitra lokal untuk menetapkan ekspektasi terhadap PANGEA. SL akan mengkomunikasikan perkembangan proyek secara akurat dan cepat kepada mitra penelitian lokal. Presentasi, webinar, dan balai kota akan menggunakan layanan penerjemahan dan materi proyek akan tersedia dalam bahasa negara-negara yang berpartisipasi. Setelah data PANGEA dikumpulkan dan ketika produk data sains tersedia, SL akan bertanggung jawab untuk memastikan bahwa mitra lokal terus menerima informasi terbaru secara berkala. SL akan menentukan arah PANGEA, dan akan memberikan contoh kepada

anggota Tim Sains lainnya tentang kolaborasi yang inklusif dan saling menghormati serta nilai dari penelitian yang menghasilkan bersama. SL dan semua anggota Tim Sains PANGAEA akan mematuhi Pedoman Komunitas PANGAEA.<sup>1</sup>

Investigasi sains PANGAEA akan dikelola oleh pimpinan Sains dan dilaksanakan oleh Tim Sains. Seperti yang telah disebutkan, keanggotaan Tim Sains akan mencakup para peneliti yang dipilih oleh NASA dan para peneliti yang direkrut oleh para peneliti utama dan peneliti pendamping Tim Sains. Investigasi PANGAEA akan melibatkan sejumlah negara di seluruh wilayah tropis. Berdasarkan pengalaman NASA di LBA, kami merekomendasikan agar *semua* investigasi memiliki penyelidik pendamping dari negara-negara hutan tropis lembab dan berusaha untuk melatih para ilmuwan dan teknisi karir awal dari negara-negara di mana penelitian PANGAEA aktif dan negara-negara lain di daerah tropis lembab. Hal ini harus diterapkan bahkan pada investigasi yang tidak memiliki komponen lapangan. Selama LBA, NASA belajar bahwa pendekatan ini memiliki banyak manfaat. Secara praktis, pendekatan ini menawarkan insentif bagi negara tuan rumah untuk mendukung pekerjaan NASA di dalam negeri, karena kapasitas yang dibangun oleh para peneliti. Para peneliti menemukan bahwa negara tuan rumah sering kali memberikan pengaruh yang signifikan untuk proyek penelitian mereka melalui kontribusi dalam bentuk barang dan dana, terutama beasiswa mahasiswa. Beberapa dekade setelah kehadiran NASA di Amerika Selatan untuk LBA berakhir, NASA masih memiliki jaringan kolaborator yang ramah di komunitas ilmiah Amerika Selatan. Dampak dari para peneliti tersebut terhadap ilmu pengetahuan di negara asalnya sangat besar. Untuk informasi lebih lanjut, lihat *Bagian 7, Pengembangan Kapasitas, Pelatihan, dan Pendidikan*.

**PANGAEA akan menekankan dan memprioritaskan keberagaman, kesetaraan, dan inklusi dalam semua aspek proyek, termasuk representasi yang beragam dalam kepemimpinannya.**

Tim Ilmuwan PANGAEA akan memprioritaskan representasi yang beragam dalam hal keahlian ilmiah, spesialisasi teknis, asal negara, ras, jenis kelamin, bahasa ibu, tahapan karir, dan banyak lagi. Para peneliti karir awal telah aktif dalam pengembangan proposal pelingkupan ini dan akan berpartisipasi dalam semua tahap proyek, seperti halnya perwakilan dari negara-negara yang berpartisipasi di mana penelitian lapangan akan dilakukan. Anggota tim harus berkomitmen untuk menghormati interaksi dengan kolaborator lokal dan keragaman budaya serta sangat berhati-hati dalam menjaga reputasi NASA secara internasional.

**Kepemimpinan dan keterlibatan selama proses pelingkupan PANGAEA menunjukkan dukungan yang luar biasa untuk proyek ini dan keragaman peserta yang memiliki kapasitas dan minat untuk berkontribusi pada PANGAEA.**

---

<sup>1</sup> Panduan Komunitas PANGAEA adalah dokumen yang dapat ditemukan di <https://tropicalforestscoping.com/community-guidelines/>. Panduan yang berasal dari panduan kelembagaan yang ada dapat diperiksa oleh NASA dan dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan manajemen program.

Selama proses pelingkupan, Ketua Kelompok Kerja Tematik PANGEA terdiri dari 22 orang yang berasal dari belahan dunia Utara dan Selatan. Demografi berikut ini menggambarkan beberapa sumbu keragaman yang diwakili oleh tim kepemimpinan dan ketua kelompok kerja PANGEA:

- 42% perempuan (n = 14 dari 33)
- 60% non-kulit putih (n = 20 dari 33)
- 30% dari negara-negara di belahan dunia Selatan (n = 10 dari 33)
- 27% karir awal (n = 9 dari 33)

Penting untuk dicatat bahwa tim pelingkupan PANGEA bekerja untuk mencapai representasi yang lebih besar dari negara-negara Selatan dalam kepemimpinan kami. Karena keterbatasan sumber daya yang dapat dialokasikan untuk mendukung secara langsung para peserta dari negara-negara Selatan, kami dibatasi. Banyak orang yang berkualifikasi tinggi dari negara-negara Selatan yang terlalu sibuk dan tidak dapat membantu memimpin upaya pelingkupan tanpa kompensasi. Namun, lebih dari 50% orang yang terlibat dalam upaya pelingkupan melalui lokakarya, pertemuan, Balai Kota, dan simposium berasal dari negara-negara Selatan. Pelajaran yang dipetik selama proses pelingkupan menjadi dasar dalam pencarian pendanaan bersama untuk proyek PANGEA. Upaya pelingkupan ini juga menunjukkan kemampuan PANGEA dalam mengimplementasikan diplomasi ilmiah secara internasional.

#### **10.1.6 Diperlukan Keterampilan Disiplin**

PANGEA dipahami sebagai proyek transdisipliner. Para ilmuwan yang terlibat dalam penelitian PANGEA dapat mengidentifikasi diri mereka dengan satu disiplin ilmu atau beberapa disiplin ilmu. Kami mengharapkan partisipasi dari para ilmuwan yang terkait dengan ilmu fisika, biologi, dan sosial. Keterampilan dan pengetahuan yang terkait dengan berbagai disiplin ilmu akan terwakili dalam Tim Sains PANGEA. Sebagai bagian dari Program Ekologi Terestrial, kami berharap bahwa ekologi di berbagai tingkat organisasi (ekosistem, komunitas, populasi) akan terwakili dengan baik. Biogeokimia dan kimia atmosfer telah lama dikaitkan dengan kampanye TE NASA, seperti halnya fisiologi tanaman dan ekofisiologi. Tim Sains akan mencakup keterampilan dan pengetahuan dari disiplin ilmu terkait lainnya termasuk sistem lahan, meteorologi, hidrologi, dan ilmu sosial. Spesialis penginderaan jarak jauh akan terwakili dengan baik dalam Tim Sains.

## 10.2 Peluang Pendanaan Bersama

Tingkat pengukuran Baseline, Threshold, dan Descope yang didefinisikan dalam *Bagian 6.2.1* mewakili proyek NASA yang berdiri sendiri tanpa ketergantungan. Namun, mengingat urgensi dan pentingnya topik ini, terdapat potensi yang kuat untuk menambah atau bahkan melebihi kontribusi NASA. Selama upaya pelingkupan, tim kepemimpinan PANGEA telah membuat langkah signifikan untuk mengamankan beragam sumber pendanaan untuk membangun investasi NASA. Berbagai lembaga pemerintah AS, yayasan swasta, pemerintah internasional, dan filantropi telah menyatakan minatnya untuk mendukung kegiatan terkait PANGEA baik di dalam maupun di luar cakupan NASA, termasuk dukungan langsung untuk mitra internasional dan implementasi Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Bertindak. Peluang untuk memanfaatkan dukungan tambahan dari mitra yang tertarik untuk bekerja sama dengan NASA termasuk contoh mitra yang tercantum dalam **Tabel 12**. Untuk rincian lebih lanjut, lihat *Lampiran A, Surat Dukungan*.

Seperti pada proyek-proyek bidang TE lainnya seperti BOREAS, LBA, dan ABoVE, tim PANGEA akan bekerja sama dengan para sponsor non-NASA untuk menggabungkan kontribusi mereka ke dalam Rencana Eksperimen Ringkas PANGEA. Proses ini akan mencakup (1) mendefinisikan kegiatan dan penyandang dana untuk memastikan dukungan yang saling melengkapi dan tidak duplikasi; (2) merampingkan manajemen, komunikasi, dan pengawasan di antara para sponsor; dan (3) mengatasi masalah keamanan data. PANGEA akan dibangun berdasarkan pengalaman TE sebelumnya yang berhasil memadukan sumber daya NASA dan non-NASA untuk mengatasi kesenjangan pengetahuan ilmu pengetahuan bumi yang kritis dan berfungsi sebagai prototipe bagi NASA untuk memajukan kemitraan semacam itu di masa depan.

**Tabel 12.** Peluang pendanaan bersama dan dukungan dalam bentuk barang dan jasa yang potensial bagi PANGEA.

USFS-IP: Program Internasional Dinas Kehutanan AS. ONACC: Observatorium Nasional untuk Perubahan Iklim (Kamerun).

AREA PROYEK	PROGRAM NASA	PEMERINTAH AS LAINNYA	PEMERINTAH INTERNASIONAL	LAINNYA
PENGINDERAAN JAUH	TE, Program Terkait	NOAA, NSF, USDA, USFS, USGS	AGEOS, ESA, INPE	Laboratorium Tanah dan Karbon, MapBiomas
HOSTING DATA	TE	DAAC, AmeriFlux (DOE)	ESA, ICOS	Global Forest Watch, Google, MoveBank, Planet
PENELITIAN	TE, Program Terkait	DOE, NOAA, NSF	NERC Inggris, Uni Eropa, Yayasan Penelitian São Paulo (FAPESP), CNPq, Forum Belmont	Schmidt Sciences, Moore Foundation
PELATIHAN DAN PENDIDIKAN	ARSET, PENGEMBANGAN, PELAYANAN, GLOBAL, Inisiatif Masyarakat Adat	USAID, USFS-IP	FCDO (Inggris), Inisiatif Satu Visi Hutan	AmIT, CBSI, R2FAC, Filantropi, Donor
APLIKASI	Aksi Bumi, SERVIR, Panen	USAID, USFS-IP, USGS	EU, GCF-TF, ONACC, OSFAC	Bezos Earth Fund, NICFI, Moore Foundation, Sektor swasta

### 10.3 Pengelolaan dan Pembagian Data Ilmu Pengetahuan Terbuka

PANGEA akan memfasilitasi ilmu pengetahuan sumber terbuka, mendorong kolaborasi, dan memaksimalkan nilai data PANGEA secara luas dan untuk jangka panjang, sejalan dengan Strategi NASA untuk Ilmu Pengetahuan Terbuka (Strategi Manajemen Data dan Komputasi untuk Ilmu Pengetahuan Terobosan 2019-2024). Strategi ini akan mematuhi prinsip-prinsip dan praktik-praktik komunitas serta memperhatikan pedoman etika dan sensitivitas budaya. PANGEA juga akan berkoordinasi erat dengan mitra-mitra Masyarakat Adat untuk memastikan kedaulatan data, khususnya termasuk Kedaulatan Data Masyarakat Adat (Indigenous Data Sovereignty/IDS). PANGEA akan membangun keberhasilan dari proyek-proyek lapangan sebelumnya dan memanfaatkan kemajuan baru dalam ilmu pengetahuan terbuka serta konsep dan teknologi manajemen data.

PANGEA akan mengintegrasikan aliran data dari berbagai sistem akuisisi data, mitra, negara, dan paradigma (misalnya, paradigma ilmu pengetahuan Barat, pengetahuan ekologi masyarakat adat, pengetahuan ekologi tradisional) (lihat **Tabel 13**). Pengelolaan data PANGEA akan mengikuti prinsip-prinsip panduan Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (FAIR) untuk meningkatkan penemuan dan aksesibilitas data, mendorong interoperabilitas dan integrasi data, serta meningkatkan penggunaan ulang dan reproduktifitas data (Wilkinson et al., 2016). Pengumpulan, pengelolaan, dan penggunaan data PANGEA juga akan selaras dengan prinsip-prinsip CARE, yang menekankan pentingnya mempertimbangkan hak-hak dan kepentingan Masyarakat Adat dan Masyarakat Setempat ketika mengelola data yang terkait dengan komunitas, lahan, dan sumber daya mereka. Prinsip-prinsip CARE untuk Tata Kelola Data Masyarakat Adat melengkapi prinsip-prinsip FAIR dengan berfokus pada dimensi etika, budaya, dan sosial dalam pengelolaan data, serta mencerminkan peran penting data dalam memajukan inovasi dan penentuan nasib sendiri Masyarakat Adat (Caroll et al., 2020).

Pengumpulan, pengelolaan, dan penggunaan data PANGEA juga mengakui pentingnya kedaulatan data, yang membutuhkan kemitraan aktif dengan Masyarakat Adat dan Masyarakat Setempat. Kedaulatan data adalah pengelolaan informasi dengan cara yang konsisten dengan hukum, praktik, dan kebiasaan negara-bangsa tempat informasi tersebut berada. Kedaulatan data adat adalah "hak Masyarakat Adat dan Bangsa-Bangsa untuk mengatur pengumpulan, kepemilikan, dan penggunaan data mereka sendiri, yang berasal dari hak yang melekat pada Masyarakat Adat untuk mengatur masyarakat, tanah, dan sumber daya mereka," dan diposisikan sebagai hak kolektif dalam kerangka kerja hak-hak Masyarakat Adat internasional (Cannon dkk., 2024). Pemegang pengetahuan adat menyimpan informasi dan data yang sensitif secara budaya. Untuk memastikan bahwa upaya pengumpulan dan pengelolaan data PANGEA dilakukan secara etis dan menghormati hak-hak Masyarakat Adat dan Masyarakat Setempat, PANGEA akan bekerja sama dengan para mitra dan Masyarakat Adat dan Masyarakat Setempat mengikuti prinsip-prinsip CARE seperti yang dijelaskan dalam **Tabel 8**.

Partisipasi dalam Tim Sains PANGEA akan membutuhkan komitmen untuk menyediakan akses gratis, terbuka, dan transparan terhadap semua data yang diperoleh sebagai bagian dari PANGEA sesuai dengan prinsip-prinsip FAIR dan CARE. Bekerja sama dengan Manajemen Program NASA, Tim Sains PANGEA, yang dipimpin oleh Kelompok Koordinasi Sains Terbuka PANGEA, akan bekerja sama dengan lembaga pemerintah, mitra pemerintah asing, dan mitra Masyarakat Adat untuk menetapkan kesepakatan pengumpulan, pembagian, dan penanganan data dan informasi serta alur kerja di tingkat nasional, lembaga internasional, dan teritorial untuk menguraikan kepemilikan data, hak penggunaan, dan rencana penyimpanan yang sesuai dengan prinsip-prinsip Sains Terbuka, FAIR, dan CARE.

PANGEA akan memprioritaskan publikasi yang ditulis pertama kali oleh para peneliti awal dan menengah dari daerah tropis dan memajukan penelitian yang dipimpin oleh masyarakat adat.

**Tabel 13.** Contoh pengelolaan data yang terkoordinasi dan kegiatan berbagi data dengan mitra.

MITRA (S)	AKTIVITAS PENGELOLAAN DAN BERBAGI DATA
<b>LBA</b>	LBA dan PANGEA akan bekerja sama untuk menyelaraskan protokol untuk berbagai jenis data termasuk inventarisasi hutan, fluks berbasis menara, dan akuisisi dari UAV. Kebijakan data LBA yang baru saja diadopsi (Juni 2024) yang telah direvisi didasarkan pada prinsip dan pedoman Ilmu Pengetahuan Terbuka, penggunaan yang adil dan transaksi yang adil, sesuai dengan prinsip-prinsip data FAIR. Data LBA akan mengadopsi lisensi Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-4.0; <a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> ). Untuk memperluas akses dan kolaborasi komunitas ilmiah dengan data program. Kebijakan data LBA yang baru ini akan membuat data LBA dan data PANGEA NASA serta kebijakan sains terbuka menjadi sangat kompatibel.
<b>ALIANSI UNTUK ILMU PENGETAHUAN HUTAN TROPIS (ATFS)</b>	Berkoordinasi dengan mitra jaringan petak hutan tropis ATFS untuk memastikan bahwa pengumpulan dan pengelolaan data lapangan dan drone mengikuti standar dan protokol yang ada.
<b>MITRA MASYARAKAT ADAT DAN KOMUNITAS LOKAL (MIS. GATC, RRI)</b>	Libatkan mitra IPLC selama pengembangan Rencana Percobaan Ringkas, jauh sebelum data dikumpulkan. Tentukan siapa yang bertanggung jawab untuk memberikan izin kepada pihak eksternal untuk mengakses data dan/atau wilayah Masyarakat Adat untuk penelitian. Membuat langkah-langkah atau kebijakan bagi peneliti dan/atau Masyarakat Adat untuk berbagi data dan/atau meminta izin untuk mengakses data atau wilayah Masyarakat Adat. Menetapkan rencana untuk pengumpulan data dan/atau pemantauan. Membangun kapasitas dan bekerja sama dengan mitra, termasuk IPLC untuk mendapatkan pendanaan untuk penyimpanan dan pengelolaan data Masyarakat Adat yang dipimpin oleh IPLC. Menyediakan pelatihan untuk membuat alat untuk IPLC yang akan mendukung pengumpulan, pengelolaan, dan penyebaran data.
<b>TIM SAINS NEON, SBG &amp; NISAR</b>	Menyelaraskan protokol di seluruh komunitas penelitian untuk mendukung penskalaan. Contoh inisiatif yang sudah ada yang akan dilibatkan oleh PANGEA antara lain tim algoritma Vegetasi Terrestrial SBG VSWIR dan jaringan cal/val NISAR. PANGEA akan berkontribusi dalam mengembangkan protokol pengumpulan data, ekstraksi data udara dan strategi pemrosesan, serta struktur basis data yang akan memungkinkan pengumpulan data lapangan dan udara yang dihasilkan oleh komunitas untuk lebih mudah diintegrasikan ke dalam set data pelatihan model yang diperlukan untuk meningkatkan algoritme untuk ekosistem yang kurang terwakili.

PANGEA akan mengikuti panduan dari Spesifikasi Konten Pelestarian Data Ilmu Pengetahuan Bumi NASA<sup>2</sup> untuk menyiapkan dan melestarikan data serta informasi terkait setelah masa proyek berakhir. Hal ini akan memungkinkan pengguna di masa depan untuk memahami bagaimana data digunakan untuk memperoleh informasi, pengetahuan, dan rekomendasi kebijakan, dan untuk memastikan reproduktifitas untuk memastikan validitas dan kemungkinan keterbatasan kesimpulan yang dicapai di masa lalu, dan untuk memberikan kepercayaan pada tren jangka panjang yang bergantung pada data dari beberapa proyek. Dokumen Pedoman Pelaksanaan Konten Pelestarian<sup>3</sup> menyediakan panduan dan daftar periksa untuk memenuhi kebutuhan PCS untuk berbagai jenis proyek penelitian ilmu pengetahuan bumi, termasuk penyelidikan udara dan lapangan.

<sup>2</sup> <https://www.earthdata.nasa.gov/esdis/esco/standards-and-practices/preservation-content-spec>

<sup>3</sup> <https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2022-07/ESDS-RFC-042VERSION1.pdf>

Bekerja sama dengan para mitra, Kantor Proyek PANGEA akan mengembangkan **Portal Informasi PANGEA (PIP)** yang dapat diakses oleh publik. Portal Informasi ini akan menguraikan strategi pengelolaan dan pembagian data PANGEA, menyediakan tautan langsung ke data, model, dan informasi tentang kegiatan yang direncanakan dan sedang berlangsung dari para peneliti dan kolaborator PANGEA, termasuk inventarisasi lokasi, waktu, dan jenis data yang dikumpulkan. Tim Ilmu Pengetahuan dan Kantor Proyek PANGEA akan bekerja sama dengan pemilik data ketika mengumpulkan dan menghubungkan ke sumber data yang ada untuk memastikan pembagian data yang kolaboratif dan etis, serta menghormati hak dan kepemilikan data yang telah dikumpulkan sesuai dengan prinsip-prinsip FAIR dan CARE. PIP akan memberikan kemudahan dalam menemukan dan mengakses data yang dikumpulkan oleh PANGEA dan juga data yang sudah ada yang berguna untuk penelitian PANGEA.

Dukungan visualisasi dan GIS akan sangat penting untuk memaksimalkan nilai data PANGEA bagi khalayak yang lebih luas. PANGEA akan bekerja sama dengan mitra-mitra yang berorientasi pada aksi seperti Global Forest Watch dan Rights and Resources Initiative untuk mengembangkan aplikasi yang memastikan data dapat diakses oleh kalangan non-ilmuwan. Data tambahan dan mekanisme pelaporan hasil akan menjadi bagian penting dari PANGEA untuk memastikan aksesibilitas bagi mitra masyarakat adat dan masyarakat lokal. Moda komunikasi spesifik akan ditentukan melalui kolaborasi dengan mitra masyarakat adat dan masyarakat setempat dan akan disesuaikan dengan bentang alam.

Sumber data dan reproduktifitas merupakan aspek penting dalam ilmu pengetahuan sumber terbuka. Protokol pengambilan sampel, metadata, pembersihan data, kode, algoritme, dan alur kerja yang terkait dengan pembuatan, pemrosesan, dan validasi data untuk PANGEA akan tersedia secara terbuka. PANGEA akan menetapkan format dan praktik yang konsisten untuk data dan metadata serta optimalisasi untuk akses dan analisis berbasis cloud, terutama untuk jenis data yang baru muncul, seperti set data berbasis drone. Kegiatan-kegiatan ini akan bekerja sama dengan, dan bukannya mencoba meniru, upaya-upaya khusus data dan disiplin ilmu yang sudah ada. Jaringan dan program yang sudah ada seperti FLUXNET, NEON, ICOS, OzFlux, TERN, dan SAEON telah berinvestasi dalam definisi standar dalam pemrosesan dan distribusi data dan bergerak menuju implementasi FAIR. Jaringan Regional juga memiliki kegiatan di daerah tropis; sebagai contoh, ICOS mengkoordinasikan proyek KADI (Pengetahuan dan layanan iklim dari observasi Afrika dan Infrastruktur penelitian Data, <https://kadi-project.eu/>) yang memiliki tujuan untuk merancang dan bergerak menuju sistem observasi iklim pan-Afrika.

Pembicaraan untuk memastikan keselarasan dengan upaya-upaya ini telah dimulai. Koordinasi akan diperdalam setelah pemilihan untuk memastikan data lapangan, data menara fluks, data drone, data perangkat kamera, data bioakustik, Pengetahuan Ekologi Pribumi dan Tradisional, dan banyak lagi dikumpulkan, disimpan, dan dibagikan dengan tepat dan sesuai dengan praktik terbaik yang tersedia. PANGEA akan memanfaatkan dan mengintegrasikan dengan kemampuan dan sistem yang sudah ada dan yang sedang berkembang yang ditawarkan oleh Sistem Data Ilmu Pengetahuan Bumi NASA sebanyak mungkin. Hal ini mencakup Pusat Arsip Aktif Terdistribusi (DAAC) untuk data dari udara, alat dan layanan DAAC untuk membuat data dari udara dan orbit lebih mudah digunakan untuk penelitian ekologi terestrial, platform Visualisasi, Eksplorasi, dan Analisis Data (VEDA) NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/esds/veda>), dan upaya berkelanjutan untuk mengoordinasikan standarisasi dan protokol data.

PANGEA juga akan mengadopsi pendekatan sumber terbuka untuk model. Model yang berpartisipasi dalam kegiatan dan proyek terkait PANGEA diharapkan memiliki kode sumber yang tersedia secara

terbuka melalui platform kolaboratif (misalnya, GitHub), dan dirilis dengan lisensi permisif yang konsisten dengan Panduan Sains Sumber Terbuka Science Mission Directorate (SMD). PANGEA akan mempromosikan tata kelola model untuk keterlibatan masyarakat termasuk kode etik, catatan teknis dan panduan pengguna, forum aktif untuk mendiskusikan masalah kode, dan jalur untuk kontribusi dengan pengembangan model dari komunitas ilmiah yang luas. Untuk mematuhi prinsip-prinsip sains terbuka PANGEA, proyek-proyek yang menjadi bagian dari PANGEA akan menyimpan versi yang tepat dari model yang telah dipublikasikan di repositori jangka panjang dengan DOI bersama dengan informasi parameter dan data yang diperlukan untuk mereproduksi hasil.

PANGEA akan mengembangkan **platform analisis data berbasis cloud** terbuka bagi para peneliti PANGEA untuk mendukung penelitian terbuka dan kolaboratif. Platform analisis data PANGEA akan didasarkan pada cloud sains yang telah berhasil diimplementasikan oleh ABoVE, SHIFT, BioSCape, dan Multi-Mission Algorithm and Analysis Platform (MAAP, <https://www.earthdata.nasa.gov/esds/maap>) milik NASA. Upaya-upaya ini menunjukkan kolaborasi data internasional yang sukses, termasuk antara NASA dan ESA (MAAP), dan dengan memanfaatkan Program Tanggung Jawab Sosial Amazon Web Services (BioSCape). Platform komputasi berbasis cloud PANGEA akan menurunkan hambatan untuk masuk, terutama bagi mitra internasional yang cenderung terbatas dalam hal bandwidth, kapasitas penyimpanan data, dan daya komputasi. Platform komputasi awan juga akan memungkinkan anggota Tim Sains PANGEA untuk dengan mudah berbagi produk data versi awal (sebelum siap untuk diarsipkan) dan memecahkan masalah analisis data secara komunal. Selain itu, materi pengembangan kapasitas, terutama buku catatan pengkodean, dapat dikembangkan secara khusus untuk lingkungan komputasi awan, yang memungkinkan siapa pun di mana pun di dunia untuk menjalankannya dan menerapkan pendekatan yang serupa. Pentingnya lingkungan komputasi awan telah ditunjukkan selama BioSCape, yang mana anggota tim sains Afrika Selatan akan sangat terbatas dalam kemampuan mereka untuk mengakses, menganalisis, dan menerapkan data kampanye.

PANGEA akan menyediakan ilmu pengetahuan sumber terbuka dan pengembangan kapasitas manajemen data selama proyek berlangsung, termasuk melalui pelatihan dan lokakarya tentang manajemen data yang bekerja sama dengan DAAC, FLUXNET, LBA, Masyarakat Adat dan organisasi mitra masyarakat lokal seperti Aliansi Global Masyarakat Teritorial, ATFS, dan banyak lagi. Banyak dari mitra-mitra ini memiliki program pelatihan yang sudah ada yang akan dimanfaatkan. PANGEA akan memprioritaskan pelatihan dan lokakarya dengan para mitra untuk mendukung upaya pengelolaan data yang independen dan terkoordinasi, yang (1) meningkatkan kapasitas masyarakat adat, masyarakat lokal, dan lembaga-lembaga tropis; dan (2) memastikan keselarasan internasional yang akan menjadi dasar bagi kumpulan data dan kolaborasi untuk berlanjut setelah proyek PANGEA. Pendanaan bersama sedang diupayakan untuk mendukung investasi infrastruktur yang diperlukan untuk memastikan bahwa ilmu pengetahuan sumber terbuka dapat dilaksanakan secara merata di seluruh lanskap PANGEA, termasuk pendanaan untuk mendukung infrastruktur listrik dan internet lokal.

## 10.4 Jadwal

Tim PANGEA telah menggunakan pertemuan virtual dan hibrida untuk keterlibatan awal dari tim cakupan sains yang beragam. Kami memiliki pendekatan hemat waktu yang dapat sangat mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk mengembangkan Rencana Percobaan Ringkas dan melanjutkan ke tahap Implementasi. **Tabel 14** menguraikan jadwal yang diusulkan, dengan asumsi kegiatan PANGEA berikutnya dimulai pada Tahun Anggaran 2025.

**Tabel 14.** Usulan jadwal PANGEA.

SDT: Tim Pendefinisian Sains. TE: Ekologi Terrestrial. CEP: Rencana Percobaan Ringkas. PAC: Kampanye Udara PANGEA. SATSM: Tim Sains dan Aplikasi dan Pertemuan Pemangku Kepentingan.

	CEP		TAHAP I			TAHAP II			TAHAP III	
TAHUN STUDI			1	2	3	4	5	6	7	8
KEGIATAN KANTOR PROYEK	FY25	FY26	FY27	FY28	FY29	FY30	FY31	FY32	FY33	FY34
PANGEA terpilih. Perencanaan terperinci dimulai: Pemilihan Tim Pendefinisian Ilmu Pengetahuan. CEP disusun, terbuka untuk ditinjau oleh masyarakat, dan selesai.										
Pengumuman peluang PANGEA (NRA) yang dirilis oleh NASA. Kantor Proyek memulai persiapan berdasarkan CEP. Proposal Tahap 1 PANGEA diberikan. SATSM pertama.										
SATSM ke-2 dan Lokakarya Perencanaan Kampanye Lintas Udara. Kampanye Lintas Udara PANGEA I (PACI)										
PANGEA SATSM ke-3 dan Perencanaan Lintas Udara. PANGEA Airborne Campaign II (PACII). Proposal dan seleksi NASA NRA PANGEA Tahap 2.										
SATSM PANGEA ke-4 dan Perencanaan Lintas Udara. Kampanye Lintas Udara PANGEA III (PACIII).										
SATSM PANGEA ke-5. Kampanye Lintas Udara PANGEA IV (PANIV).										
SATSM PANGEA ke-6. Kampanye Udara Cadangan PANGEA V (PANV). NASA NRA PANGEA Tahap 3 Proposal dan seleksi.										
SATSM PANGEA ke-7.										
SATSM PANGEA ke-8.										

## 10.5 Penilaian Risiko

PANGEA akan menggunakan manajemen risiko proaktif untuk memitigasi semua risiko untuk semua kegiatan proyek, termasuk hal-hal seperti perjalanan, kerja lapangan, penggunaan peralatan, dan operasi di udara dan lapangan di seluruh wilayah studi tropis yang luas yang diperlukan untuk menghasilkan ilmu pengetahuan yang berdampak tinggi. Kantor Proyek akan menyusun daftar risiko proyek yang komprehensif, menilainya dengan Matriks Penilaian Risiko standar, memberikan penilaian risiko ini kepada para peserta, dan memantau kepatuhan. Proyek ini juga akan berkoordinasi dengan persyaratan kesehatan dan keselamatan dari setiap lembaga mitra. Untuk kasus-kasus berisiko tinggi dan menengah, proyek ini akan mengembangkan dan mengimplementasikan rencana mitigasi, yang akan ditinjau dengan Kantor Program NASA. PANGEA memperkirakan sebagian besar risiko akan terbagi ke dalam tiga kategori: (1) kesehatan dan keselamatan; (2) memenuhi tujuan ilmu pengetahuan; dan (3) memenuhi tujuan pelibatan masyarakat dan aplikasi.

**Kesehatan dan keselamatan:** Proyek ini akan mengikuti pedoman kesehatan dan keselamatan perjalanan yang dikeluarkan oleh Biro Urusan Konsuler Departemen Luar Negeri AS dan setiap individu akan mengikuti penilaian risiko proyek yang dirancang oleh kantor proyek PANGEA. PANGEA juga akan bekerja sama dengan Kedutaan Besar, Konsulat, dan Kantor Keamanan Regional AS setempat untuk mendapatkan panduan. Mengingat sifat terpencil dari banyak lokasi studi, proyek akan mengembangkan rencana untuk transportasi yang aman ke lokasi studi lapangan, baik dengan kendaraan off-road, perahu, atau metode lainnya. Proyek ini juga akan mengembangkan rencana untuk keselamatan awak pesawat dan operator instrumen selama kampanye, mengikuti pedoman NASA untuk operasi pesawat dan di darat. Beberapa wilayah studi yang potensial termasuk risiko malaria, demam kuning, dan penyakit lainnya; proyek ini akan memastikan para peserta mendapat informasi tentang vaksin yang relevan dan profilaksis lainnya sebelum kunjungan lapangan.

**Memenuhi tujuan sains:** Kantor Proyek akan bekerja secara proaktif untuk melibatkan mitra institusional dan mengembangkan Nota Kesepahaman (MOU) formal, dengan bantuan kantor OIIR NASA, ESPO, dan Departemen Luar Negeri AS. Kampanye udara internasional telah berulang kali terganggu oleh lambatnya izin pendaratan dan birokrasi yang terkait, dan sebagian besar dari hal ini dapat dihindari dengan memulai proses MOU formal lebih awal. Meskipun menggunakan pesawat NASA untuk pengamatan udara memiliki manfaat, penggunaan pesawat ini membutuhkan izin diplomatik baik di negara area studi maupun selama transit. Izin diplomatik terkadang hanya dapat diperoleh mendekati tanggal yang dibutuhkan, sehingga sebagian kampanye atau seluruh kampanye dapat dibatalkan dalam waktu singkat. Selain itu, karena pesawat NASA dioperasikan oleh pegawai negeri AS, ada risiko penutupan pemerintah AS yang menunda atau membatalkan penerbangan sains, terutama pada periode Oktober-Desember. Kantor Proyek PANGEA akan mempertimbangkan risiko-risiko ini dan risiko-risiko lainnya serta dapat mempertimbangkan untuk menggunakan pesawat komersial untuk mengurangi risiko-risiko ini.

Cuaca juga merupakan pertimbangan penting dalam keberhasilan akuisisi data lapangan dan udara untuk PANGEA, terutama untuk pengamatan optik yang membutuhkan kondisi bebas awan. Selama fase Definisi Sains, PANGEA akan menjalankan analisis iklim untuk menentukan waktu terbaik dalam setahun untuk pengamatan udara. Selama kampanye udara, PANGEA akan bekerja sama dengan peramal cuaca lokal yang memahami iklim setempat untuk memfasilitasi pengambilan data udara dan pengukuran lapangan yang sukses.

Kerja lapangan memiliki banyak risiko. Bagi mereka yang tidak bekerja di hutan tropis, risiko seperti ular berbisa dan laba-laba berbisa mungkin akan muncul di benak mereka. Meskipun risiko biologis ini nyata, PANGEA dapat mengelolanya dengan membuat dan menegakkan pedoman keselamatan dan mendidik para peserta. Risiko terbesar bagi para peserta proyek sering kali terjadi selama transportasi ke dan dari lokasi lapangan. Perjalanan dengan truk dan kapal adalah risiko terbesar selama LBA. PANGEA dapat mengurangi risiko ini dengan memastikan bahwa pengemudi dilatih dan kendaraan dirawat dengan baik. Risiko lain di lapangan termasuk penyakit dan hilangnya peralatan melalui pencurian dan kekerasan. Profilaksis medis dapat mengurangi penyakit endemik, seperti malaria, dan kekerasan dapat dihindari melalui hubungan masyarakat yang baik, kesadaran situasional, dan komunikasi. PANGEA akan memitigasi semua risiko ini dengan melakukan pelatihan keselamatan lapangan dan kesadaran budaya yang spesifik untuk daerah setempat serta membangun hubungan yang baik dengan masyarakat setempat.

**Memenuhi tujuan pelibatan masyarakat dan aplikasi:** Melibatkan masyarakat setempat dan mengembangkan hasil ilmu pengetahuan dan aplikasi yang akan berguna bagi berbagai kalangan membutuhkan koordinasi dan upaya yang sungguh-sungguh. Risiko bagi PANGEA adalah upaya pelibatan masyarakat tidak berhasil dan/atau aplikasi yang dihasilkan tidak bermanfaat. PANGEA akan mengambil beberapa tindakan untuk mengurangi risiko ini. PANGEA akan bersama-sama menyusun rencana pelibatan untuk setiap lanskap selama pengembangan Rencana Percobaan Ringkas yang mencakup pencapaian, tujuan, dan metrik untuk mengevaluasi keberhasilan secara teratur selama proyek berlangsung. PANGEA akan merangkul inklusivitas dan secara aktif bekerja untuk mengembangkan dan mempromosikan praktik-praktik yang inklusif dan dikembangkan bersama. Mengembangkan proyek bersama dan bekerja secara adil dengan semua mitra, termasuk masyarakat adat dan masyarakat lokal dapat memakan waktu yang lama. PANGEA akan terus bekerja keras untuk membangun hubungan yang telah terjalin lama. Namun, mengingat terbatasnya durasi kerja lapangan PANGEA di setiap lokasi, ada risiko bahwa proyek tidak akan memenuhi tujuan-tujuan ini. PANGEA akan bekerja sama dengan para mitra untuk mengembangkan rencana untuk melanjutkan dukungan setelah durasi proyek berakhir. PANGEA akan bekerja untuk menjaga hubungan dengan mitra masyarakat selama proyek berlangsung dan akan bekerja sama dengan mitra internasional dan industri untuk mendapatkan dana tambahan untuk mendukung upaya-upaya ini guna meningkatkan kedalaman dan kebermaknaan hubungan ini.

# 11 Kredit Gambar

**Gambar 1.** Diterbitkan dalam Liu dkk. (2017).

**Gambar 2.** Panel (a) diadaptasi dari Schimel dkk. (2015). Panel (b) dibuat oleh Alison Hoyt, Clarice Perryman, dan Fa Li.

**Gambar 3.** Dibuat oleh Félicien Meunier. Panel (a) diadaptasi dari Friedlingstein dkk. (2014) (pembaruan dari CMIP5 ke CMIP6). Panel (b) digambar ulang dari IPCC AR6 dengan data terbaru.

**Gambar 4.** Gambar utama dibuat oleh Jamy Silver. Skema penskalaan di sisi kanan gambar dibuat oleh Lizbeth de la Torre.

**Gambar 5.** Dibuat oleh Yanlei Feng, Robinson Negron-Juarez, dan Hannah Stouter.

**Gambar 6.** Dibuat oleh Hannah Stouter.

**Gambar 7.** Dibuat oleh Elsa Ordway.

**Gambar 8.** Dibuat oleh Sofia Shen.

**Gambar 9.** Dibuat oleh Yanlei Feng, Hannah Stouter, dan Marcos Longo.

**Gambar 10.** Dibuat oleh Elsa Ordway.

**Gambar 11.** Dibuat oleh Ovidiu Csillik.

**Gambar 12.** Diterbitkan dalam Cavender-Bares dkk. (2022).

**Gambar 13.** Diadaptasi dari Ordway dkk. (2022).

**Gambar 14.** Diadaptasi dari Chadwick dan Asner (2016a).

**Gambar 15.** Dibuat oleh Hannah Stouter, Marius von Essen, Ane Alencar, dan Maria Santos.

**Gambar 16.** Dibuat oleh Yanlei Feng dan Hannah Stouter.

**Gambar 17.** Dibuat oleh Marcos Longo.

**Gambar 18.** Dibuat oleh Félicien Meunier dan Elsa Ordway.

**Gambar 19.** Gambar asli dari Fisher dan Koven (2020), proses baru yang disertakan oleh Marcos Longo dan Renato Braghieri.

**Gambar 20.** Dibuat oleh Virginia Zaunbrecher.

**Gambar 21.** Dibuat oleh Adia Bey.

**Gambar 22.** Dibuat oleh Michael Keller dan Elsa Ordway

## 12 Daftar Istilah

**Bioekonomi:** Sistem ekonomi yang digerakkan oleh penelitian dan inovasi dalam ilmu hayati dan bioteknologi, yang mencakup aplikasi berbasis hayati dan bio-enabled yang transformatif di berbagai bidang seperti energi, bahan kimia, material canggih, perbaikan lingkungan, pertanian, elektronik, dan kesehatan. Hal ini dimungkinkan oleh kemajuan teknologi di bidang teknik, komputasi, dan ilmu informasi ([Schmidt Futures, 2022](#)).

**Keanekaragaman hayati:** Keanekaragaman kehidupan di Bumi, termasuk variasinya pada tingkat gen, spesies, ciri-ciri fungsional, dan ekosistem. Di hutan tropis, keanekaragaman hayati sangat tinggi di dalam dan di sepanjang hutan, mendukung interaksi yang kompleks dan fungsi ekosistem, serta menyebabkan heterogenitas dalam respons dan ketahanan terhadap iklim.

**Siklus biogeokimia:** Siklus biogeokimia mencakup pergerakan dan transformasi elemen-elemen penting (misalnya, karbon, nitrogen, dan fosfor) melalui biosfer, atmosfer, hidrosfer, dan litosfer bumi. Di hutan tropis, siklus ini sangat dinamis, dengan perputaran hara dan biomassa yang cepat; meskipun demikian, hutan tropis memainkan peran penting dalam penyimpanan karbon global.

**Cadangan dan fluks karbon:** Cadangan karbon mengacu pada jumlah total karbon yang tersimpan dalam suatu sistem (misalnya, dalam vegetasi, tanah, atau lautan), sedangkan fluks karbon mewakili pergerakan karbon ke dalam dan ke luar dari cadangan tersebut melalui proses seperti fotosintesis, respirasi, dan penguraian, dan termasuk fluks karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), dan aliran karbon lateral.

**Interaksi dan umpan balik iklim:** Interaksi dua arah antara sistem iklim dan ekosistem. Hutan tropis secara langsung mengatur siklus karbon, air dan energi. Perubahan iklim (seperti pergeseran suhu dan curah hujan) dan penggunaan lahan serta perubahan tutupan lahan (seperti kebakaran dan degradasi hutan) dapat mengubah dinamika ekosistem hutan, sehingga menciptakan lingkaran umpan balik yang mempengaruhi stabilitas iklim global.

**Manfaat bersama:** Kontribusi positif bersama keanekaragaman hayati dan keanekaragaman budaya bagi manusia dan spesies lainnya. Kontribusi ini terkait dengan konsep kontribusi alam bagi manusia dan kontribusi manusia bagi alam (Levis et al, 2024).

**Komunitas:** Kelompok formal dan informal yang menganggap diri mereka sebagai anggota yang dapat berbagi minat, pengalaman, sumber daya, kegiatan, profesi, mata pencaharian, budaya, geografi, asal-usul, bahasa, atau kombinasi dari hal-hal di atas.

**Dinamika gangguan:** Dinamika gangguan bervariasi menurut jenis, intensitas, dan frekuensinya, dan melibatkan peristiwa-peristiwa yang disebabkan oleh alam maupun manusia, seperti kebakaran, badai, kekeringan, dan penebangan, yang mengganggu ekosistem serta mempengaruhi struktur dan fungsinya. Di hutan tropis, gangguan-gangguan ini dapat menyebabkan pergeseran dalam siklus biogeokimia, keanekaragaman hayati, dan umpan balik terhadap iklim serta sistem sosial-ekologi.

**Ekosistem:** PANGEA menggunakan definisi ekosistem menurut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), yang mencakup manusia sebagai organisme kunci, sehingga mencakup agro-ekosistem dan sistem sosial-ekologi yang lebih luas. Sebuah unit fungsional yang terdiri dari organisme hidup, lingkungan hidup, dan interaksi di dalam dan di antara mereka. Komponen-komponen yang termasuk dalam suatu ekosistem dan batas-batas spasialnya bergantung pada tujuan

pendefinisian ekosistem tersebut: pada beberapa kasus, batas-batas tersebut relatif tajam, sementara pada kasus lainnya, batas-batas tersebut menyebar. Batas-batas ekosistem dapat berubah seiring berjalannya waktu. Ekosistem bersarang di dalam ekosistem lain, dan skalanya dapat berkisar dari yang sangat kecil hingga seluruh biosfer. Pada era sekarang, sebagian besar ekosistem mengandung manusia sebagai organisme kunci atau dipengaruhi oleh dampak aktivitas manusia di lingkungannya. (IPCC AR6 WGI, WGII, WGIII)

**Jasa ekosistem:** Jasa ekosistem adalah manfaat yang diperoleh manusia dari ekosistem alami, termasuk penyediaan (misalnya makanan, air), pengaturan (misalnya pengaturan iklim, pengendalian banjir), pendukung (misalnya siklus hara, pembentukan tanah), dan jasa budaya (misalnya rekreasi, nilai spiritual).

**Degradasi hutan:** Hutan terdegradasi ketika tingkat gangguan eksogen melebihi tingkat rata-rata jangka panjang gangguan eksogen untuk ekosistem dan dampak dari gangguan tersebut dapat dibedakan dari struktur dan/atau komposisi hutan tua. Penebangan, kebakaran, pertambangan, dan fragmentasi adalah penyebab umum degradasi hutan.

**Kegiatan yang ramah hutan:** Kegiatan ekonomi yang menggunakan sumber daya hutan dengan cara yang melestarikan integritas ekologi hutan dan mendukung mata pencaharian berkelanjutan masyarakat setempat IUCN (2021).

**Fungsi hutan:** Fungsi hutan mengacu pada peran ekologis hutan, seperti mengatur iklim, mendukung keanekaragaman hayati, siklus nutrisi, dan menyediakan habitat, yang berkontribusi terhadap kesehatan dan stabilitas ekosistem secara keseluruhan. Fungsi hutan meliputi produktivitas primer bruto (GPP), produktivitas kayu, respirasi ekosistem, dan evapotranspirasi.

**Struktur hutan:** Biomassa, tinggi kanopi, kerapatan batang, heterogenitas tinggi vertikal, dan distribusi kerapatan area tanaman vertikal

**Aktivitas manusia:** Praktik dan perilaku ekonomi, subsisten, budaya, dan pembangunan formal, informal, legal, ilegal, dan tradisional, serta perilaku manusia yang mengarah pada eksploitasi, perubahan, dan degradasi ekosistem hutan, termasuk penebangan, pembangunan infrastruktur, pertanian, pemeliharaan ternak, kebakaran, pertambangan, perburuan dan eksploitasi satwa liar, dan produksi arang.

**Perubahan penggunaan lahan:** Perubahan penggunaan lahan dan tutupan lahan mengacu pada perubahan permukaan bumi, termasuk perubahan cara penggunaan lahan (misalnya, pertanian, urbanisasi) dan pergeseran tutupan fisik (misalnya, deforestasi, reboisasi, perluasan wilayah perkotaan).

**Ketahanan:** Kapasitas sistem sosial, ekonomi, dan ekologi yang saling berhubungan untuk mengatasi peristiwa, tren, atau gangguan berbahaya, merespons atau menata ulang dengan cara-cara yang mempertahankan fungsi, identitas, dan struktur esensialnya. Ketahanan adalah atribut positif ketika mempertahankan kapasitas untuk adaptasi, pembelajaran, dan/atau transformasi (Dewan Arktik, 2016). (IPCC AR6 WGI, WGII, WGIII)

**Sistem sosial-ekologi:** Sistem yang saling berhubungan antara manusia dan alam, di mana komponen ekologi dan sosial saling berinteraksi dan mempengaruhi satu sama lain. Di hutan tropis, sistem ini dibentuk oleh mata pencaharian, praktik budaya, dan penggunaan sumber daya oleh masyarakat lokal

hingga global, sementara perubahan ekologi berdampak pada kesejahteraan sosial, menciptakan umpan balik yang kompleks antara aktivitas manusia dan stabilitas ekosistem.

**Masyarakat yang rentan:** Masyarakat yang paling mungkin mengalami dampak buruk perubahan iklim dan degradasi lingkungan, termasuk masyarakat adat, masyarakat berpenghasilan rendah, dan mereka yang bergantung pada sumber daya alam untuk mata pencaharian mereka. Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim (UNFCCC) (2020).

**Kerentanan:** Kecenderungan sistem sosial dan ekologi serta praktik-praktiknya untuk terpengaruh secara negatif oleh perubahan, yang mencakup kepekaannya terhadap perubahan dan kemampuannya untuk beradaptasi. Diadaptasi dari (FAO 2013).

## 13 Akronim dan Singkatan

<b>ATAS</b>	Eksperimen Kerentanan Boreal Arktik
<b>ABSOLUG</b>	Simulator Tata Kelola Penggunaan Lahan Berbasis Agen
<b>AGEOS</b>	Badan Studi dan Pengamatan Antariksa (Gabon)
<b>AGU</b>	Persatuan Geofisika Amerika
<b>AI</b>	Kecerdasan buatan
<b>AI/ML</b>	Kecerdasan Buatan dan Pembelajaran Mesin
<b>AI4ESP</b>	Kecerdasan Buatan Artificial Intelligence untuk Prediksi Sistem Bumi
<b>AmeriFlux</b>	Jaringan menara Flux dengan kovarians eddy Amerika
<b>AmIT</b>	Institut Teknologi Amazon
<b>AMMA-CATCH</b>	Analisis Multidisiplin Monsun Afrika Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle Hydrologique
<b>AMMI</b>	Magister Kecerdasan Mesin Afrika
<b>AMSRE</b>	Radiometer Pemindaian Gelombang Mikro Canggih untuk Misi EOS
<b>AndesFlux</b>	Menara Flux yang dioperasikan oleh PUCP
<b>ARES</b>	Fasilitas Penelitian Udara untuk Sistem Bumi
<b>ARLA</b>	Tingkat Kesiapan Aplikasi
<b>ASTER</b>	Radiometer Emisi dan Pantulan Termal Ruang Angkasa Tingkat Lanjut
<b>ATBC</b>	Asosiasi Biologi dan Konservasi Tropis
<b>ATFS</b>	Aliansi untuk Ilmu Pengetahuan Hutan Tropis
<b>ATTO</b>	Observatorium Menara Tinggi Amazon (Presidente Figueiredo, Brasil)
<b>BiomeE</b>	A Model vegetasi demografis NASA-GISS
<b>Bentang Alam</b>	Survei Keanekaragaman Hayati di Tanjung
<b>BOREAS</b>	Studi Ekosistem-Atmosfer Boreal
<b>CARAFE</b>	Eksperimen Fluks Udara Karbon/Carbon Airborne Flux
<b>Pelacak Karbon</b>	Sistem asimilasi data untuk pelacakan CO <sub>2</sub>
<b>KARDAMOM</b>	Kerangka Kerja Pemodelan Data Karbon

<b>PEDULI</b>	Manfaat Kolektif, Wewenang untuk Mengendalikan, Tanggung Jawab, dan Etika
<b>CBFP</b>	Kemitraan Hutan Basin Kongo (Congo Basin Forest Partnership)
<b>CBI</b>	Institut Lembah Kongo (Congo Basin Institute)
<b>CBSI</b>	Prakarsa Ilmu Pengetahuan Cekungan Kongo (Congo Basin Science Initiative)
<b>CCE</b>	Siklus Karbon dan Ekosistem (Kantor NASA)
<b>CENAREST</b>	Pusat Penelitian Ilmiah dan Teknologi Nasional (Gabon)
<b>CEOS</b>	Komite Satelit Pengamatan Bumi
<b>CEP</b>	Rencana Percobaan Ringkas
<b>CFIS</b>	Spektrometer Pencitraan Fluoresensi Klorofil
<b>CGIAR</b>	Kelompok Konsultatif untuk Penelitian Pertanian Internasional
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metana
<b>CHIME</b>	Misi Pencitraan Hiperspektral Copernicus untuk Lingkungan
<b>CIAT</b>	Pusat Internasional untuk Pertanian Tropis
<b>CIFOR-ICRAF</b>	Pusat Penelitian Kehutanan Internasional dan Agroforestri Dunia
<b>CLiMA</b>	Aliansi Pemodelan Iklim
<b>CLM</b>	Model Lahan Masyarakat
<b>CMIP</b>	Proyek Perbandingan Model Gabungan
<b>CMIP5</b>	CMIP-Fase 5
<b>CMIP6</b>	CMIP-Fase 6
<b>CMS-Flux</b>	Sistem Pemantauan Karbon Sistem inversi fluks
<b>CNES</b>	Badan Antariksa Nasional Prancis
<b>CO<sub>2</sub></b>	Karbon dioksida
<b>COCCON</b>	Jaringan Pengamatan Kolom Karbon Kolaboratif
<b>Rekan Peneliti</b>	Rekan Peneliti
<b>COMIFAC</b>	COMIFAC
<b>CongoFlux</b>	Menara fluks kovarians eddy di Cekungan Kongo
<b>COS</b>	Karbonil sulfida

<b>CSDA</b>	Akuisisi Data SmallSat Komersial
<b>ISYARAT</b>	Efisiensi penggunaan karbon
<b>DEI</b>	Keragaman, kesetaraan, dan inklusi
<b>DGVM</b>	Model Vegetasi Global Dinamis
<b>DLR</b>	Pusat Kedirgantaraan Jerman
<b>DOE</b>	Departemen Energi
<b>E3SM</b>	Model Sistem Bumi Exascale Energi
<b>EBV</b>	Variabel Keanekaragaman Hayati Esensial
<b>ECOSTRESS</b>	Eksperimen Radiometer Termal yang Diturunkan Melalui Ruang Angkasa di Stasiun Luar Angkasa
<b>ED</b>	Demografi Ekosistem
<b>ED2</b>	Model Demografi Ekosistem versi 2
<b>ED3</b>	Model Demografi Ekosistem versi 3
<b>EDGE</b>	Penjelajah Geodetik Dinamika Bumi
<b>eDNA</b>	Asam deoksiribonukleat lingkungan
<b>ELM</b>	Model Tanah E3SM
<b>EMIT</b>	Investigasi Sumber Debu Mineral Permukaan Tanah Earth
<b>ENSO</b>	Osilasi Selatan El Nino
<b>Ent TBM</b>	Model Biosfer Terrestrial Ent
<b>EOS</b>	Sistem Pengamatan Bumi
<b>ES2A</b>	Strategi Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi NASA
<b>ESA</b>	Masyarakat Ekologi Amerika
<b>ESA</b>	Badan Antariksa Eropa
<b>ESM</b>	Model Sistem Bumi
<b>ESRI</b>	Environmental Systems Research Institute, Inc.
<b>ET</b>	Penguapan air (evapotranspirasi)
<b>EUDRE</b>	Peraturan Komoditas Bebas Deforestasi Uni Eropa

<b>FAIR</b>	Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable
<b>FAO</b>	Organisasi Pangan dan Pertanian (Perserikatan Bangsa-Bangsa)
<b>FAPESP</b>	Yayasan Penelitian São Paulo
<b>FATES</b>	Simulator Ekosistem Terrestrial yang Dirakit Secara Fungsional
<b>FIFE</b>	Percobaan Lapangan ISLSCP Pertama
<b>FLEX</b>	Misi Penjelajah Fluoresensi
<b>FLUXNET</b>	Jaringan menara fluks kovarians eddy global
<b>ForestGEO</b>	Forest Global Earth Observatory
<b>ForestPlots</b>	Jaringan untuk mengukur, memantau, dan memahami hutan dunia
<b>FORMIND</b>	Model Hutan Model berbasis individu
<b>FTAC</b>	Komite Aksi Jalur Cepat (untuk Layanan Iklim)
<b>GAO</b>	Observatorium Udara Global (Global Airborne Observatory)
<b>GATC</b>	Aliansi Global Komunitas Teritorial
<b>GCF-TF</b>	Satuan Tugas Iklim dan Hutan Gubernur
<b>GEDl</b>	Investigasi Dinamika Ekosistem Global
<b>GEM</b>	Jaringan Pemantauan Ekosistem Global
<b>GEO BONGroup</b>	on Earth Observations Jaringan Observasi Keanekaragaman Hayati
<b>GEO</b>	Kelompok Pengamatan Bumi
<b>GEO-PHONI</b>	Kelompok Pengamatan Bumi-Pohon
<b>GRK</b>	Gas rumah kaca
<b>GIS</b>	Sistem Informasi Geografis
<b>GISS</b>	Institut Goddard untuk Studi Antariksa (NASA)
<b>GLOBEGlobal</b>	Belajar dan Observasi untuk Memberi Manfaat bagi Lingkungan
<b>GNSS</b>	Sistem Satelit Navigasi Global
<b>GOES</b>	Satelit Lingkungan Operasional Geostationary
<b>GOSAT</b>	Satelit Pengamat Gas Rumah Kaca
<b>GPM</b>	Pengukuran Curah Hujan Global

<b>GPP</b>	Produktivitas primer bruto
<b>GPS</b>	Sistem Pemosisian Global
<b>GPU</b>	Unit pemrosesan Grafis
<b>GRACE</b>	Pemulihan Gravitasi dan Eksperimen Iklim
<b>GRACE-FO</b>	Misi Lanjutan Pemulihan Gravitasi dan Eksperimen Iklim
<b>GSFC</b>	Pusat Penerbangan Luar Angkasa Goddard
<b>Guyaflux</b>	Menara fluks kovarians Eddy di Stasiun Lapangan Paracou (Sinnamary, Guyana Prancis)
<b>Guyafor</b>	Jaringan 54 plot jangka panjang di 17 lokasi di Guyana Prancis
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Water
<b>HBCU</b>	Perguruan Tinggi dan Universitas Kulit Hitam Bersejarah
<b>HiLDEN</b>	Jaringan Ekologi Drone Lintang Tinggi
<b>MARKAS BESAR</b>	Kantor Pusat
<b>HYSPLIT</b>	Model transportasi dan dispersi atmosfer NOAA
<b>HyTES</b>	Spektrometer Emisi Termal Hiperspektral
<b>IA</b>	Melaksanakan perjanjian
<b>ICCN</b>	Institut Konservasi Alam Kongo
<b>ICOS</b>	Sistem Pengamatan Karbon Terpadu
<b>IEK</b>	Pengetahuan ekologi masyarakat adat
<b>IITA</b>	Institut Internasional untuk Pertanian Tropis
<b>ILAMB</b>	Proyek Pembandingan Model Lahan Internasional (International Land Model Benchmarking)
<b>INPA</b>	Institut Nasional Penelitian Amazon (Brasil)
<b>INEP</b>	Institut Nasional untuk Penelitian Antariksa (Brasil)
<b>IPBES</b>	Platform Kebijakan-Sains Antar Pemerintah tentang Keanekaragaman Hayati dan Jasa Ekosistem
<b>IPCC</b>	Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim
<b>IPLC</b>	Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal

<b>IRD</b>	Institut Penelitian untuk Pengembangan (Prancis)
<b>ISLSCP</b>	Proyek Klimatologi Permukaan Darat Satelit Internasional
<b>ISRO</b>	Organisasi Penelitian Antariksa India
<b>ITCZ</b>	Zona Konvergensi Intertropis
<b>IUCN</b>	Persatuan Internasional untuk Konservasi Alam
<b>JAXA</b>	Badan Eksplorasi Kedingantaraan Jepang
<b>JSBACH</b>	Skema Jena untuk Penggabungan Biosfer-Atmosfer dalam model Hamburg
<b>JULI</b>	Simulasi Lingkungan Darat Bersama Inggris Raya
<b>K34</b>	Menara kovarians eddy kilometer 34 (Manaus, Brasil)
<b>K67</b>	Menara kovarians eddy kilometer 67 (Belterra, Brasil)
<b>LAI</b>	Indeks Luas Daun
<b>LBA</b>	Eksperimen Biosfer-Atmosfer Berskala Besar di Amazonia
<b>LBA-ECO</b>	Kontribusi Program Ekologi Terestrial NASA untuk fase pertama LBA
<b>LBNL</b>	Lawrence Berkeley National Laboratory
<b>LCLUC</b>	Tutupan Lahan dan Perubahan Penggunaan Lahan (NASA)
<b>LEK</b>	Pengetahuan ekologi lokal
<b>LPJ</b>	Model vegetasi global dinamis Lund-Potsdam-Jena
<b>LPJ-GUESS</b>	Simulator Ekosistem Umum LPJ
<b>LST</b>	Suhu permukaan tanah
<b>LUH2</b>	Proyek Harmonisasi Tata Guna Lahan, versi 2
<b>LVIS</b>	Sensor Tanah, Vegetasi, dan Es
<b>MAAP</b>	Algoritma Multi-Misi dan Platform Analisis
<b>MapBiomass</b>	Inisiatif Pemetaan Bioma
<b>MASTER</b>	MODIS/ASTER Radiometer Emisi dan Pantulan Termal dari Antariksa
<b>MetaFlux</b>	Kerangka kerja meta-pembelajaran untuk ilmu iklim
<b>MINFOF</b>	Kementerian Hutan dan Fauna, Kamerun
<b>ML</b>	Pembelajaran mesin

<b>ModEX</b>	Model-Eksperimen
<b>MODIS</b>	Spektroradiometer Pencitraan Resolusi Sedang
<b>MOU</b>	Nota kesepahaman
<b>MRV</b>	Pemantauan, pelaporan, dan verifikasi
<b>MSI</b>	Lembaga yang Melayani Minoritas
<b>N<sub>2</sub></b>	ONitrous oxide
<b>NASA</b>	Badan Penerbangan dan Antariksa Nasional
<b>NASA-CASA</b>	Model ekosistem NASA Carnegie-Ames-Stanford
<b>NBE</b>	Pertukaran biosfer bersih
<b>NDVI</b>	Indeks Perbedaan Vegetasi yang dinormalisasi
<b>NEON</b>	Jaringan Observatorium Ekologi Nasional
<b>NGEE-Tropis</b>	Eksperimen Ekosistem Generasi Berikutnya-Tropis
<b>LSM</b>	Lembaga Swadaya Masyarakat
<b>NISAR</b>	Misi SAR NASA-ISRO
<b>NOAA</b>	Administrasi Kelautan dan Atmosfer Nasional
<b>NOANET</b>	Jaringan Akses Terbuka Barat Laut
<b>PLTN</b>	Produktivitas primer bersih
<b>NSB</b>	Dewan Ilmu Pengetahuan Nasional
<b>NSC</b>	Karbohidrat nonstruktural
<b>NSF</b>	National Science Foundation (Yayasan Ilmu Pengetahuan Nasional)
<b>NSTC</b>	Dewan Sains dan Teknologi Nasional
<b>OCO-2/3</b>	Mengorbit Observatorium Karbon-2 atau -3
<b>OECMs</b>	Tindakan Konservasi Efektif Lainnya
<b>OFVi</b>	Inisiatif Satu Visi Hutan (One Forest Vision Initiative)
<b>OIIR</b>	Kantor Hubungan Internasional dan Antarlembaga NASA
<b>ONACC</b>	Observatorium Nasional untuk Perubahan Iklim (Kamerun)
<b>ANGGREK</b>	Mengatur Karbon dan Hidrologi dalam Ekosistem yang Dinamis

<b>ORNL</b>	Laboratorium Nasional Oak Ridge
<b>OSFAC</b>	Observatorium Satelit Hutan Afrika Tengah
<b>OSSE</b>	Mengamati Eksperimen Simulasi Sistem
<b>PAC</b>	Kampanye Lintas Udara Pangea
<b>PACE</b>	Misi Ekosistem Plankton, Aerosol, Awan, lautan
<b>PANGEA</b>	Investigasi tropis PAN tentang bioGeokimia dan Adaptasi Ekologi
<b>PecAn</b>	Penganalisis Ekosistem Prediktif
<b>PFT</b>	Jenis fungsional tanaman
<b>PhenoCam</b>	Kamera Fenologi
<b>PI</b>	Penyelidik Utama
<b>PIP</b>	Portal Informasi PANGEA
<b>PUCP</b>	Universitas Katolik Kepausan Peru
<b>QA/QC</b>	Penilaian kualitas dan kontrol kualitas
<b>R2FAC</b>	Jaringan Penelitian Hutan Afrika Tengah
<b>RAINFOR</b>	Jaringan Inventarisasi Hutan Amazon
<b>RDK</b>	Republik Demokratik Kongo
<b>RepastSymphony</b>	Perangkat Simulasi Agen Berpori Rekursif dengan antarmuka Symphony Java
<b>RESSAC</b>	Program Penelitian Terapan dalam Ekologi dan Ilmu Sosial
<b>RGB</b>	Merah hijau biru
<b>RRI</b>	Prakarsa Hak dan Sumber Daya
<b>RUBISCO</b>	Mengurangi Ketidakpastian dalam Interaksi Biogeokimia melalui Sintesis dan Komputasi
<b>SATSM</b>	Tim Sains dan Aplikasi dan Pertemuan Pemangku Kepentingan
<b>SBG</b>	Misi Biologi dan Geologi Permukaan
<b>SDT</b>	Tim Pendefinisian Science
<b>SERVIR</b>	SERVIR adalah kemitraan NASA dan USAID yang mendukung upaya-upaya yang dipimpin secara lokal untuk memperkuat ketahanan iklim, ketahanan pangan dan air, pengelolaan hutan dan karbon, serta kualitas udara.

<b>SES</b>	Sistem sosial-ekologi
<b>BERGESER</b>	Rangkaian Waktu Frekuensi Tinggi SBG
<b>SIF</b>	Fluoresensi yang diinduksi oleh matahari (klorofil)
<b>SUTERA</b>	Sekolah untuk Pengetahuan Adat dan Lokal
<b>SimPachamama</b>	Model simulasi hibrida untuk pertukaran sosial-lingkungan
<b>SL</b>	Kepemimpinan Sains
<b>SLAS</b>	Luas daun spesifik
<b>SMAPS</b>	Kelembaban Tanah Aktif Pasif
<b>SMOS</b>	Kelembaban Tanah dan Salinitas Laut
<b>SPUN</b>	Masyarakat untuk Perlindungan Jaringan Bawah Tanah
<b>SSC</b>	Komite Pengarah Ilmiah
<b>SSP</b>	Jalur Sosial Ekonomi Bersama
<b>SST</b>	Suhu permukaan laut
<b>STEM</b>	Sains, teknologi, teknik, dan matematika
<b>STILT</b>	Model Transportasi Lagrangian Waktu Terbalik Stokastik
<b>STRI</b>	Institut Penelitian Tropis Smithsonian
<b>SWOT</b>	Misi Topografi Air Permukaan dan Lautan
<b>Tallo</b>	Basis data alometri pohon dan arsitektur tajuk global
<b>TBD</b>	Untuk ditentukan
<b>TCCON</b>	Jaringan Pengamatan Kolom Karbon Total
<b>TE</b>	Ekologi Terrestrial
<b>TEK</b>	Pengetahuan ekologi tradisional
<b>TERN</b>	Jaringan Penelitian Ekosistem Terrestrial
<b>TIR</b>	Radiasi inframerah termal
<b>TIRS</b>	Sensor Inframerah Termal
<b>TmFO</b>	Observatorium Hutan yang dikelola Tropis

<b>TRISHNA</b>	Satelit Pencitraan Inframerah Termal untuk Penilaian Sumber Daya Alam Beresolusi Tinggi
<b>TRL</b>	Tingkat Kesiapan Teknologi
<b>TROLL</b>	Representasi Pohon dari model Tingkat Lanskap
<b>TROPOMI</b>	Instrumen Pemantauan Troposfer
<b>TRY</b>	Database Sifat Plant
<b>U.S. (AMERIKA SERIKAT)</b>	Amerika Serikat
<b>UAV</b>	Kendaraan udara tanpa awak
<b>UCLA</b>	Universitas California, Los Angeles
<b>UNFCCC</b>	Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim
<b>UN-SDSN</b>	Jaringan Solusi Pembangunan Berkelanjutan Perserikatan Bangsa-Bangsa
<b>USAID</b>	Badan Pembangunan Internasional Amerika Serikat )
<b>USDA</b>	Departemen Pertanian AS
<b>USFS</b>	Dinas Kehutanan A.S.
<b>USGS</b>	Survei Geologi Amerika Serikat (U.S. Geological Survey)
<b>VEDA</b>	Visualisasi, Eksplorasi, dan Analisis Data
<b>VIIRS</b>	Rangkaian Radiometer Pencitraan Inframerah Terlihat
<b>VOC</b>	Senyawa organik yang mudah menguap
<b>VOD</b>	Kedalaman optik vegetasi
<b>VPD</b>	Defisit tekanan uap
<b>VPRM</b>	Model Fotosintesis dan Respirasi Vegetasi
<b>VSWIR</b>	Terlihat oleh inframerah gelombang pendek
<b>WRI</b>	World Resources Institute
<b>WUE</b>	Efisiensi penggunaan air

## 14 Lampiran

- A. Surat Dukungan
- B. Mitra & Kegiatan Keterlibatan PANGEA
- C. Keterlibatan Selama Studi Pelingkupan
- D. Kegiatan Penelitian dan Pemantauan yang Direncanakan dan Sedang Berlangsung
- E. Tabel Pengukuran PANGEA Terperinci
- F. Tanggapan terhadap Umpan Balik
- G. Topik di luar Lingkup PANGEA

## Tabel Model

**Tabel X.** Keterangan Tabel PANGEA.

Catatan Tabel PANGEA.

<b>JUDUL TABEL C PANGEA</b> Isi Judul Kolom Standar: 198/224/220	<b>JUDUL TABEL C PANGEA</b> Isi Subpos Abu-abu Alternatif: 210/210/210	<b>JUDUL TABEL C PANGEA</b> <b>SECARA MANUAL DIKURANGI MENJADI 8 PT</b> Isi Judul Biru Alternatif dengan Warna yang Sama dengan Hijau: 194/225/241
<b>JUDUL TABEL L PANGEA</b> Isi Judul Baris Standar: 227/240/249	Teks Tabel PANGEA Isi Abu-abu Alternatif: 239/239/239	Teks Tabel PANGEA secara manual diperkecil menjadi 8 pt-seperti yang mungkin harus dilakukan di beberapa tempat.
<b>JUDUL TABEL L PANGEA</b>	Teks Tabel PANGEA	Teks Tabel PANGEA
<b>JUDUL TABEL L PANGEA</b>	• Meja Peluru PANGEA	Teks Tabel PANGEA
<b>JUDUL TABEL L PANGEA</b>	Teks Tabel PANGEA	Teks Tabel PANGEA
<b>JUDUL TABEL L PANGEA</b>	Teks Tabel PANGEA	Teks Tabel PANGEA
<b>JUDUL TABEL L PANGEA</b>	Teks Tabel PANGEA	Teks Tabel PANGEA
<b>JUDUL TABEL L PANGEA</b>	Teks Tabel PANGEA	Teks Tabel PANGEA

Catatan Tabel PANGEA.

<p><b>Kotak X. Judul Kotak PANGEA</b></p> <p>Teks dalam kotak PANGEA. Isi kotak biru: 228/232/251.</p>
--

<p>Teks dalam kotak PANGEA. Isi kotak hijau: 217/234/211.</p>
---

Tabel sel tunggal tiruan untuk menampung gambar dan keterangan (tanpa Bingkai):

Gambar dalam gaya Kata Gambar PANGEA.

**Gambar X.** Keterangan gambar dalam gaya PANGEA Word (dengan nomor gambar dicetak tebal secara manual).

## A. Surat Dukungan

Alexander von Humboldt Institute (Instituto Humboldt);

<https://www.humboldt.org.co/>

Alliance Bioversity & International Center for Tropical Agriculture (CIAT);

<https://alliancebioversityciat.org/>

Jaringan menara fluks eddy-covariance AmeriFlux-Amerika; <https://ameriflux.lbl.gov/>

Amazon Institute of Technology (AmIT); <https://amit.institute/>

Amazon Tall Tower Observatory (ATTO); <https://www.attoproject.org/>

Menara AndesFlux-flux yang dioperasikan oleh Universitas Katolik Kepausan Peru (PUCP)

Fasilitas Penelitian Udara untuk Sistem Bumi (ARES);

<https://www.uzhfoundation.ch/en/projects/sustainability/ares-airborne-research-facility-for-the-earth-system-1>

Batelle National Ecological Observatory Network (NEON);

<https://www.neonscience.org/>

Survei Keanekaragaman Hayati Tanjung (BioSCape); <https://www.bioscape.io/>

Model vegetasi demografi BiomeE-NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS);

<https://ntrs.nasa.gov/citations/20220017198>

Pusat Penelitian Kehutanan Internasional dan Agroforestri Dunia (CIFOR-ICRAF);

<https://www.cifor-icraf.org/>

Pusat Studi Amazonia Berkelanjutan (CEAS); <https://ceas.usp.br/>

Aliansi Pemodelan Iklim (CLiMA); <https://clima.caltech.edu/>

Prakarsa Ilmu Pengetahuan Cekungan Kongo (Congo Basin Science Initiative/CBSI);

<https://congobasinscience.net/>

CongoFlux- menara fluks kovarians eddy di Cekungan Kongo -Tim Universitas Ghent;

<https://www.congo-biogeochem.com/congoflux>

Program penelitian pengukuran dan pengambilan sampel lahan gambut Kongo;

<https://congopeat.net/>

Komunitas pemodelan Demografi Ekosistem (ED2);

<https://github.com/EDmodel/ED2>

Embrapa (Perusahaan Penelitian Pertanian Brasil) Acre;

<https://www.embrapa.br/en/international>

Embrapa Florestas; <https://www.embrapa.br/en/international>

Environmental Systems Research Institute, Inc (ESRI); <https://www.esri.com/en-us/home>

FLUXNET CH<sub>4</sub>-inisiatif untuk menyusun basis data global pengukuran fluks metana

kovarians eddy; <https://fluxnet.org/data/fluxnet-ch4-community-product/>

Organisasi Pangan dan Pertanian (FAO); <https://www.fao.org/fao-office-climate-change-biodiversity-environment/en>

ForestGEO; <https://forestgeo.si.edu/>

ForestPlots-jaringan untuk mengukur, memantau, dan memahami hutan dunia ; <https://forestplots.net/>

Badan Studi dan Pengamatan Antariksa Gabon (AGEOS); <http://spaceinafrica.com/2019/02/26/all-about-ageos-gabon-space-program/>

Group on Earth Observations-Trees (GEO-TREES); <https://geo-trees.org/>

Global Land Analysis & Discovery (GLAD); <https://glad.umd.edu/>

Satuan Tugas Gubernur untuk Iklim dan Hutan (GCF-TF); <https://www.gcftf.org/>

Menara kovarians Guyaflux-eddy di Stasiun Lapangan Paracou (Sinnamary, Guyana Prancis); <https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyaflux-tower>

Guyafor-jaringan 54 plot jangka panjang di 17 lokasi di Guyana Prancis; <https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyafor-network>

Sistem Pengamatan Karbon Terpadu (ICOS); <https://www.icos-cp.eu/>

Institut Internasional untuk Pertanian Tropis (IITA); <https://www.iita.org/>

Mancomunidad Regional Amazónica (MRA) - Persemakmuran Regional Amazon Inisiatif

MapBiomas-Biome Mapper; <https://brasil.mapbiomas.org/en/>

NASA Harvest; <https://www.nasaharvest.org/>

Pusat Penelitian Ilmiah dan Teknologi Nasional, Gabon (CENAREST); <https://www.cenarest-gabon.org/>

Institut Nasional untuk Penelitian Antariksa, Brasil (INPE); <https://www.inpe.br/crc/>

Observatorium Nasional untuk Perubahan Iklim, Kamerun (ONACC); <https://onacc.cm/>

Eksperimen Ekosistem Generasi Berikutnya (NGEE)-Tropis; <https://ngee-tropics.lbl.gov/>

One Forest Vision Initiative (OFVi); <https://www.oneforestvision.org/>

Pennsylvania State University, Departemen Meteorologi dan Sains Atmosfer; <https://www.met.psu.edu/>

Planet; <https://www.planet.com/>

Predictive Ecosystem Analyzer (PecAn); <https://pecanproject.github.io/>

Rainforest Foundation Norway; <https://www.regnskog.no/en/>

Mengurangi Ketidakpastian dalam Interaksi Biogeokimia melalui Sintesis dan Komputasi (RUBISCO);

<https://climatemodeling.science.energy.gov/projects/reducing-uncertainty-biogeochemical-interactions-through-synthesis-and-computation-rubisco>

Lembaga Penelitian untuk Pembangunan, Prancis (IRD); <https://en.ird.fr/>

Observatorium Satelit Hutan Afrika Tengah (OSFAC); <https://www.osfac.net/>

Masyarakat untuk Perlindungan Jaringan Bawah Tanah (SPUN);

<https://www.spun.earth/>

Jaringan Solusi Pembangunan Berkelanjutan PBB (UN-SDSN);

<https://www.unsdsn.org/>

UK Centre for Ecology and Hydrology; <https://www.ceh.ac.uk/>

Universidad Nacional del Altiplano (UNAP) Peru; <https://www.portal.unap.edu.pe/>

*Surat dalam bahasa Spanyol, diikuti dengan terjemahan surat dalam bahasa Inggris*

Universidad Nacional de Piura Peru (UNP)-Departemen Agronomi;

<https://www.gob.pe/unp>

Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Peru (UNTRM)

<https://www.untrm.edu.pe/portal/en/>

Université catholique de Louvain, Belgia-Institut Bumi dan Kehidupan;

<https://uclouvain.be/en/research-institutes/eli>

Kantor Wakil Rektor Universitas California, Los Angeles (UCLA) untuk Penelitian dan Kegiatan Kreatif; <https://www.research.ucla.edu/>

Universitas Energi dan Sumber Daya Alam (UENR) Ghana, Kantor Wakil Rektor;

<https://uenr.edu.gh/>

Program Internasional Dinas Kehutanan Amerika Serikat (US Forest Service

International Program/USFS-IP); <https://www.fs.usda.gov/about-agency/international-programs>

Jaringan Fluks Afrika Barat

Wildlife Conservation Society (WCS); <https://www.wcs.org/>

Pusat Penelitian dan Iklim Woodwell; <https://www.woodwellclimate.org/>

World Resources Institute (WRI); <https://www.wri.org/>

December 4<sup>th</sup> 2024

**NASA Earth Science Division**

NASA Headquarters  
300 E Street SW  
Washington, D.C. 20546

Dear Members of the NASA Earth Science Division,

On behalf of the Alexander von Humboldt Institute, I am writing to express our strong support for the PAN-Tropical Investigation of BioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA) initiative. We are eager to collaborate in advancing PANGAEA's scientific objectives in Colombia, and to contribute to the broader goal of understanding tropical forest resilience to climate change and land-use dynamics.

The Humboldt Institute's mission is to conduct basic and applied research on Colombia's biodiversity, including the creation of a national inventory of the country's biotic, hydrobiological, and genetic resources. This mission aligns perfectly with PANGAEA's goal to investigate tropical forests and their responses to environmental change. We have a significant expertise in conducting biodiversity monitoring using a variety of tools, including forest inventory plots, plant trait measurements, bioacoustic monitoring, camera traps, and eDNA collection. We also specialize in integrating field-based data with advanced remote sensing, such as hyperspectral and lidar technologies, making us a strong partner for PANGAEA's goal of scaling biodiversity measurements across tropical landscapes. Our ongoing research in the Colombian Amazon, Andean regions, and other tropical ecosystems positions us well to support PANGAEA's efforts, particularly in enhancing our understanding of the impacts of climate change and land-use on biodiversity and ecosystem function.

A key objective of PANGAEA is to prepare the next generation of scientists from tropical countries, particularly from regions like the Amazon and Congo Basins, who will carry the work forward. The Humboldt Institute is deeply committed to fostering capacity building for effective biodiversity conservation and its sustainable use, particularly among local and Indigenous communities. We have a strong record of engaging postdocs, and undergraduates in field research, as well as facilitating exchanges with global researchers. We therefore look forward to contributing to PANGAEA's training efforts by offering research opportunities and mentoring to students and early-career scientists from Colombia and the broader tropical regions. By collaborating on workshops and field-based training, the Humboldt Institute can help ensure that PANGAEA's activities are aligned with local research priorities and the knowledge needs of tropical nations.

---

**Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt**

Somos el Instituto Nacional de la Biodiversidad

 NIT 820000142-2

 Sede principal: Calle 28A #15-09 Bogotá DC, Colombia

 PBX: (57)(1) 320 2767

 [www.humboldt.org.co](http://www.humboldt.org.co)

Ultimately, our primary goal is to ensure that biodiversity knowledge is transformed into actionable solutions for conservation and sustainable development. To reach this objective, we work hand-in-hand with local communities, decision-makers, and the private sector to implement science-based solutions for biodiversity conservation, land-use planning, and climate adaptation. These efforts directly support PANGEA's objective of using science to inform decision-making and guide actions for climate change mitigation, biodiversity conservation, and sustainable land use.

In sum, the Humboldt Institute is well-positioned to support PANGEA's goal of developing tools for monitoring environmental changes, such as fire risks, biodiversity trends, and carbon sequestration. Our expertise in biodiversity monitoring, our commitment to capacity building, and our experience translating scientific research into actionable knowledge make us a valuable partner for PANGEA. Together, we can contribute to more resilient, sustainable, and informed management of tropical forests and the biodiversity they support.

Sincerely,



Jose Manuel Ochoa  
Centro de Estudios Socioecológicos y Cambio Global  
Alexander von Humboldt Institute  
Bogotá, Colombia



**RM-CJ-209-2024**  
**August 21, 2024**

**Dr. Elsa Ordway**  
**Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology**  
**University of California Los Angeles**  
**410K Botany Building**  
**Los Angeles, CA, 90095**  
**USA**

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN Tropical Investigation of BioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. The International Center for Tropical Agriculture (CIAT) is happy to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

CIAT is a non-for-profit, non-governmental research organization established in 1967, with headquarters in Palmira-Colombia and various regional offices worldwide. Our goal is to deliver research-based solutions that harness agricultural biodiversity and sustainably transform food systems to improve people's lives in a climate crisis. To achieve our objectives, we currently conduct research on crop improvement, agrobiodiversity conservation, and climate-smart agriculture in regions including Latin America, Africa, and Asia.

PANGEA aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, CIAT can provide cost-shared funding in the form of in-kind support. This includes staff time, as well as evidence-based data and information derived from our collaborations with national and regional governments, other CGIAR Centers and private sector actors. These partners play a critical role in advancing agricultural and ecological research in their respective regions and are essential in achieving sustainable land management practices. Engaging with these partners is beneficial for PANGEA as they bring local knowledge, research expertise, and strong connections with farming communities that



The Alliance of Bioversity International and the International Center for Tropical Agriculture (CIAT) is part of CGIAR, a global research partnership for a food-secure future.  
Bioversity International is the operational name of the International Plant Genetic Resources Institute (IPGRI).

The Americas Hub  
Km 17, Recta Cali-Palmira CP 763537  
Apartado Aéreo 6713  
Cali, Colombia  
Tel. (+57) 602 4450000

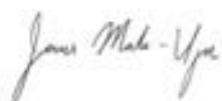
[alliancebioversityciat.org/](http://alliancebioversityciat.org/)  
[www.cgiar.org](http://www.cgiar.org)

are directly affected by climate change. Our expertise spans sustainable and zero-deforestation business and investment models, bioeconomy, biodiversity monitoring, and climate services, integrating comprehensive crop and soil data.

We conduct various initiatives and projects in the Amazon Basin within the tropical rainforest ecosystem because it is a critical region for global biodiversity and carbon storage. This site is of strategic importance to PANGEA due to its high biodiversity and the significant impact of deforestation and land-use change on global climate patterns. CIAT has been working in this location for over 40 years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with local stakeholder engagement, data collection, and capacity-building activities.

While our organization excels at harnessing agricultural biodiversity to drive sustainable food systems and improve livelihoods, particularly through our expertise in community engagement, the integration of crop and soil data, and biodiversity monitoring, we seek to engage with PANGEA to enhance our work in Central Africa and Southeast Asia along the Amazon rainforest. Specifically, PANGEA can support us by providing advanced Earth observation tools and methodologies that will complement our on-the-ground research. This collaboration will help us improve our understanding of ecosystem dynamics, monitor deforestation impacts, and strengthen our ability to develop climate-smart strategies. By integrating PANGEA's insights with our existing data, we can enhance our efforts in biodiversity conservation and sustainable land management in this critical region.

PANGEA offers a unique opportunity to explore novel research hypotheses that are crucial for understanding tropical forest systems in the face of rapid environmental changes. We are excited to collaborate on this groundbreaking research and contribute to advancing our collective knowledge of these vital ecosystems. We look forward to engaging in new research endeavors under the PANGEA initiative and leveraging its insights to enhance our efforts in Central Africa and Southeast Asia along the Amazon rainforest.



**Javier Mateo-Vega**

**Global Director Partnerships & Communications**



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary  
Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Jena, December 5, 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If funded, PANGEA will significantly advance data and methods gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are very aligned with activities conducted by the Amazon Tall Tower Observatory.

The Amazon Tall Tower Observatory (ATTO; [www.attoproject.org](http://www.attoproject.org)) is a Brazilian-German collaborative project funded primarily by the Brazilian Ministry for Science Technology and Innovation (MCTI), the German Ministry for Education and Research (BMBF), and the Max Planck Society. ATTO, the Amazon Tall Tower Observatory, is a unique scientific platform in the central Amazon, 150 km northeast of Manaus. The overall goal of ATTO is to provide a site for long-term research on the changing role of Amazon forests in the Earth system. Research at ATTO seeks to improve fundamental understanding of the complex physical, chemical and biological interactions between the world's largest expanse of tropical forest and the atmosphere. It includes multidisciplinary studies with over 200 collaborating researchers using the single site to study the balance of energy, water and trace gases, the importance of forests in atmospheric chemistry and aerosol formation, clouds and convection, and the processes underlying seasonal and interannual variations in atmosphere-forest exchange for the diverse ecosystems found in the footprints of ATTO's 80-m and 325-m tall towers.



It is clear that the goals of ATTO and PANGAEA are inherently synergistic. For example, both PANGAEA and ATTO will seek to link remotely sensed (aircraft and satellite) characteristics with ground observations. Likewise, ATTO is integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests, which complements PANGAEA's overall objectives.

Should PANGAEA be selected, the ATTO project will be open to opportunities for collaboration. ATTO already involves ~200 collaborating researchers from a range of institutions and disciplines. We have a process for integrating new projects that involves a proposal by potential new investigators, a search for synergies with ongoing research, an assessment of resources needed to support implementation, and an ultimate decision about the integration of the proposed research through our Science Steering Committee. We imagine there are many ways that ATTO can find synergies with PANGAEA, and also that PANGAEA help can put ATTO measurements into the broader context of other tropical forests.

PANGAEA is an exciting project that will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As the co-coordinator of ATTO from the German side of the project, I confirm our interest in and support for the PANGAEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between ATTO and PANGAEA.

Sincerely,

Prof. Susan Trumbore, PhD

Dept. Biogeochemical Processes



Lawrence Berkeley National Laboratory



Dr. Margaret S. Torn  
Senior Scientist & Senior Program Advisor  
Climate & Ecosystem Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory  
mstorn@lbl.gov

Oct 20, 2024

Dear Dr. Elsa Ordway and PANGEA Team,

I am writing on behalf of the AmeriFlux Management Project to express our support for the NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA), and to signify our intent to collaborate with PANGEA to produce actionable science on tropical forests around the world.

I lead the AmeriFlux Management Project (AMP), which serves the AmeriFlux Network of 674 field sites and teams measuring land-atmosphere fluxes of carbon, water, and energy using the eddy covariance technique. The U.S. DOE established AMP at Berkeley Lab in 2012 to support the AmeriFlux community and AmeriFlux sites, through activities like data quality assurance and control (QA/QC), technical support, and outreach. AmeriFlux site teams across the Americas, from Chile to Alaska, share their data with the network and we make data openly available at [ameriflux.lbl.gov](http://ameriflux.lbl.gov). The network also encompasses the global community of scientists and stakeholders who use the data for myriad applications. AmeriFlux datasets, and the understanding derived from them, provide crucial linkages between terrestrial ecosystem processes and climate-relevant responses at landscape, regional, and continental scales.

AmeriFlux has a long history of working with NASA and providing validation data for NASA missions. In fact, we have just convened a Theme Year of Remote Sensing, which emphasized the value of combining remotely sensed and ground-based observations, and increased collaborations with NASA partners. If PANGEA is selected for funding, we will coordinate with the project to advance these capabilities further.

Tropical forests are important ecosystems of interest for the AmeriFlux community. If PANGEA is selected for funding, we will work with the project and make AmeriFlux resources available in a number of ways.

- The AmeriFlux data archive, with over 3500 site-years of downloadable data, will be available to PANGEA researchers. It would be highly beneficial to expand the set of observations in tropical forests, specifically.
- AMP maintains a set of eddy-flux instrument packages which we loan for up to three years (rapid response systems); PANGEA-affiliated scientists would be able to apply to deploy these systems in tropical forests.
- We will coordinate with PANGEA on joint events, such as workshops and training opportunities.
- We will invite PANGEA researchers to participate in our active research community and events. AmeriFlux regularly comes together in community events, and forms working groups to address new challenges and harness opportunities. The PANGEA project would be invited to host sessions at the AmeriFlux Annual Meeting, give updates at the AmeriFlux AGU Town Hall, and other participation.
- Should new eddy covariance sites for measuring carbon fluxes be established for PANGEA, we will assist in registering them in AmeriFlux, offer technical advice, and provide data QA/QC, processing, and publication.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "Margaret Torn". The signature is fluid and cursive, with the first name "Margaret" and the last name "Torn" clearly visible.

Margaret Torn



November 7<sup>th</sup>, 2024.

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for**  
**PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express our strong support for NASA's Terrestrial Ecology Field Campaign proposal: PAN-tropical Investigation of Biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). If selected, this campaign will address gaps in data, methods, and applications related to measuring, understanding, and scaling carbon, water, and energy fluxes in tropical forests, as well as their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. PANGAEA has the potential to support and enhance the Sustainable Development and Local Resource Exploration; Education and Scientific Training; and International Research and Innovation Networks activities led and conducted by AmIT in the Pan-Amazon region.

The Amazonian Institute of Technology (AmIT) is a non-profit initiative established in 2022 in Brazil (<https://amit.institute/>). Our mission is to contribute to the socioeconomic development and improved quality of life of the Amazonian population, in synergy with the conservation and valorization of forests and rivers, by transforming scientific and traditional knowledge into technological innovation serving the Amazon and the world. To achieve our objectives, we plan to operate in the countries of the Amazon basin. Currently, we are in contact with Peru and Colombia to develop activities involving: Advanced Technologies for the Amazon; Human Development for the Amazon; Sustainability for the Amazon Biome; Amazonian Environmental Services; and Applied Biological Sciences for the Development of the Amazon.

We recognize alignment between the efforts and objectives of AmIT and PANGAEA, particularly in Sustainable Development and Local Resource Exploration; Education and Scientific Training; and Formation of International Research and Innovation Networks. We are eager to support PANGAEA's efforts to leverage Earth observation with multidisciplinary methods to conduct research. AmIT is enthusiastic about the prospect of engaging diverse communities in the tropics to promote scientific understanding, strengthen research and monitoring capacity, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We seek initiatives with local communities and institutions in partner with Amazonian countries. We are undertaking this initiative in the Amazon due to our strategic geographic position and the region's importance to PANGAEA, considering the risks the Amazon faces. AmIT proposes the socioeconomic



development of Amazonian populations through the use of Science and Technology to address the region's major challenges in strategic areas such as conservation, bioeconomy, health, infrastructure, and technological innovation. AmIT has a 25-year agenda for its work in the Amazon.

If PANGAEA is funded, our team will also consider developing joint research proposals to seek funding that supports participation in studies related to PANGAEA and AmIT. We believe this is an important project with high-impact potential that can significantly contribute to knowledge about the Amazon. On behalf of AmIT, I express my full support for the PANGAEA campaign and hope that NASA's support for PANGAEA will allow us to pursue this common interest.

Sincerely,

Adalberto Luis Val  
Amazonian Institute of Technology  
Manaus, AM, Brazil



INTE 050-2024

**Dr. Elsa Ordway**

Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Lima, 22 October, 2024

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PANtropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). If selected, this campaign will fill critical gaps in our understanding of biogeochemical cycles in tropical forests and their feedbacks with climate, biodiversity, and human activities. PANGAEA will also complement and reinforce national and international activities led by NASA and DOE, aligning with ongoing collaborations with AndesFlux, a network led by the Pontifical Catholic University of Peru.

The synergies between AndesFlux and PANGAEA are evident, particularly in the measurement and analysis of biogeochemical gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ), using eddy flux towers, and forest dynamics, using inventory plots. For years, AndesFlux has been at the forefront of monitoring these processes across five sites spanning the climatic gradient of the western Amazon. Our goal is to elucidate the drivers of biogeochemical gas fluxes and forest dynamics in one of the most understudied regions of the Amazon basin.

We are enthusiastic about PANGAEA's vision to leverage Earth observation data and multidisciplinary approaches to advance tropical ecology. The campaign's commitment to engaging diverse communities across the tropics resonates with our own objectives of advancing scientific understanding, building capacity for research and monitoring, and applying results to inform climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

The western Amazon holds strategic importance for achieving PANGAEA's objectives. The data we are collecting here are critical for developing a comprehensive understanding of Amazonian ecosystems. Should PANGAEA be funded, AndesFlux can offer logistical support across our five sites to validate and improve satellite-derived measurements. We also envision using our existing data to collaborate on PANGAEA-related studies, which would benefit from dedicated research funding.



As a longstanding leader in measuring biogeochemical gases and forest dynamics in the Western Amazon, the Pontifical Catholic University of Peru is equally committed to capacity building. Through PANGEA, we aim to expand opportunities for Peruvian scientists by supporting their participation in Master's and Ph.D. programs that utilize AndesFlux data. This will ensure a pipeline of skilled researchers equipped to tackle critical ecological questions.

PANGEA represents an unparalleled opportunity to enhance our collective understanding of Earth systems. As professors and principal investigators of AndesFlux, we express our unwavering support for this campaign and are optimistic that NASA's backing will enable us to pursue these shared research goals.

Founded in 1917, the Pontifical Catholic University of Peru is a leading private research institution based in Lima. Our mission is to advance knowledge and innovation through rigorous research, academic excellence, and community engagement. To achieve these objectives, we operate projects in diverse ecosystems, including tropical forests, coastal zones, and Andean environments, where we focus on ecological monitoring, capacity building, and sustainable development initiatives.

We look forward to the potential of contributing to PANGEA and are confident that this partnership will yield transformative scientific and societal impacts.

A blue ink signature of Eric G. Cosio, consisting of a stylized, flowing script.

**Eric G. Cosio, Ph.D.**  
Director, INTE-PUCP  
Professor  
Science Department

A blue ink signature of Norma Salinas, consisting of a stylized, flowing script.

**Norma Salinas, Ph.D.**  
Senior Research Scientist, INTE-PUCP  
Associate Professor  
Science Department



UZH, President's Services, Rämistrasse 71, 8001 Zurich

---

Prof. Dr. Elsa M. Ordway  
University of California, Los Angeles  
USA

**Prof. Dr. Michael Schaepman**  
Professor of Remote Sensing  
University of Zurich  
Switzerland

09 November 2024

**Letter of Support for PANGEA**

Dear Dr. Ordway

This letter of support refers to your white paper of PANGEA («The PAN tropical of bioGeochemistry and Ecological Adaptation») discussing the scoping of a NASA-sponsored field campaign.

The above white paper provides in depth information on the scientific rationale, a study design concept for a field campaign, addressing the key science questions of PANGEA, and its rationale and implementation. We have read with great interest the white paper and we are pleased to fully support its goals within the possibilities of the University of Zurich.

More specifically, the University of Zurich acts as Principal Investigator for an airborne observatory named ARES (Airborne Research Facility for the Earth System) with the imaging spectrometer AVIRIS-4 serving as core instrument. AVIRIS-4 is an instrument jointly developed between NASA JPL and the University of Zurich and in operation since 2024.

The ARES team and infrastructure is glad to support PANGEA with airborne acquisitions. The scientific content of PANGEA is of utmost importance and relevance; therefore, the University of Zurich expresses its willingness to provide some in-kind financing for the deployment of ARES for PANGEA.

We are looking forward to a continued excellent collaboration!

Kind regards,

Prof. Dr. Michael Schaepman  
President, Professor of Remote Sensing

[Click or type here to enter the enclosures.]



November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Forest Ecosystems & Global Change Lab  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
elsaordway@ucla.edu

Dear Dr. Ordway,

On behalf of Battelle and the NEON program, I am writing regarding your research proposal entitled, “PANGAEA (PAN tropical investigation of and Ecological Adaptation) - A Scoping Study for the NASA Tropical Terrestrial Ecology Campaign” being submitted to NASA’s Terrestrial Ecology Program.

If PANGAEA is funded, Battelle will work together with you on the proposed effort as we would for any appropriately related NASA-funded project, subject to availability of resources and alignment of the proposed activities with NEON's mission.

PANGAEA is a proposed, decade-long campaign that employs satellite and airborne remote sensing paired with ground and flux tower measurements to characterize how heterogeneous tropical forests within and among continents vary in response to anthropogenic pressures to understand and predict their vulnerability or resiliency to future change. If selected, PANGAEA will establish a network of centrally coordinated field and airborne campaigns that are distributed across targeted tropical forest ecosystems to fill data gaps and enable scaling between field and remotely sensed datasets, as well as regional and pan-tropical scale modeling.

The National Ecological Observatory Network (NEON), funded by the U.S. National Science Foundation and operated by Battelle, offers open, high-quality, continental-scale ecological data and samples. These resources are freely accessible, enabling researchers to understand and predict ecological responses to environmental changes. NEON operates 47 terrestrial and 34 aquatic sites across the U.S., including Alaska, Hawaii, and Puerto Rico. In coordination with in-situ observational and instrumented systems (e.g., eddy covariance flux towers), NEON conducts airborne remote sensing surveys, with the Airborne Observation Platform (AOP), to gather regional-scale landscape data during peak greenness, providing insights into land cover, ecological changes, and the impact of invasive species. All NEON data and resources are freely accessible for download, sharing, and analysis via the NEON Data Portal or the NEON Data API.

We are closely integrated with the environmental and ecological research community through collaboration, standardized practices, data usage, and research support services. NEON also provides educational and training resources to foster the next generation of students and scientists and aims to broaden and diversify the community for effective utilization of NEON data, samples, and technology.

Battelle promotes a safe and inclusive working environment on the NEON Program that complies with the NSF requirement for Safe and Inclusive Working Environments for Off-Campus or Off-Site Research. It is expected that any individuals working with NEON staff will adhere to the NEON Code of Conduct to create a safe and positive community experience for all.

We are actively collaborating with the NASA EMIT team to develop scaling workflows between NEON and satellite data in preparation for NASA's upcoming Surface Biology and Geology (SBG) mission, and PANGEA could strengthen collaboration and engage a broader research community. There will be strong synergies between NEON and PANGEA in methods optimization and advancement, data collection and processing standards, algorithm development, scaling approaches, training, validation of satellite analyses and large-scale synthesis studies using NEON-like data across global ecological gradients. The NEON Program would benefit from collaboration with PANGEA, given NEON's sites in Hawaii and Puerto Rico fall within PANGEA's extended pan-tropical domain.

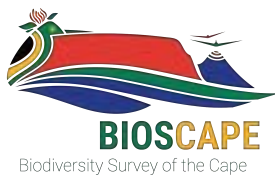
PANGEA will be crucial for assessing the resilience and vulnerability of tropical forests to climate change, and provide guiding data in biodiversity conservation, climate change adaptation, and mitigation.

Sincerely,

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Paula Mabee". The signature is fluid and cursive, with the first name "Paula" being more prominent than the last name "Mabee".

Paula Mabee, Ph.D.

Chief Scientist and Observatory Director  
National Ecological Observatory Network (NEON)  
Battelle  
Boulder, CO USA  
[mabee@battelleecology.org](mailto:mabee@battelleecology.org)



BioSCAPE: The Biodiversity Survey of the Cape  
% Adam Wilson  
Department of Geography  
University at Buffalo  
Buffalo  
NY, 14261, USA

Dear Review Panel,

It is our pleasure to recommend the PANGEA project and to offer the experience and expertise of BioSCAPE as a resource for its success. BioSCAPE is a biodiversity-focused airborne and field campaign funded by NASA's Biodiversity and Ecological Conservation Program. The project aims to enhance our understanding of terrestrial and aquatic ecosystems in South Africa through advanced imaging spectroscopy, thermal, and lidar data collection. The ultimate goal of BioSCAPE has been to advance our capability to measure biodiversity from space, shedding light on ecosystem structure, function, and composition.

The BioSCAPE campaign presented an exceptionally complex Concept of Operations. The science team included 19 PI-led research teams with unique objectives and distinct geographic regions of interest. The campaign required near-simultaneous data collection of target areas by four NASA instruments aboard two separate aircraft—an orchestration made even more challenging by varying environmental conditions and science requirements. Moreover, the BioSCAPE team was intentionally international, with over 150 members, nearly half of whom were affiliated with institutions outside the U.S. While this diversity brought tremendous value, it also presented challenges in equitable funding due to restrictions on direct U.S. federal funding for non-U.S. affiliates. Additionally, the science team was diverse in scientific discipline, proximity to end-users, field experience, local knowledge, technical capacity, and culture. Consequently, BioSCAPE was vulnerable to parachute science. Being aware of this risk, BioSCAPE made a concerted effort to prevent parachute science through co-developing research with end-users in mind and demonstrating a commitment to Open Science, capacity building, and outreach.

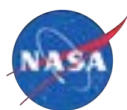
BioSCAPE was a huge success, and we hope to share the lessons we learned with PANGEA and support them in executing high-quality, inclusive international NASA science. Specifically, the BioSCAPE leadership team will support PANGEA by offering advice on:

- Executing a complex airborne and field campaign in a middle-income country with a diverse set of science team objectives.
- Making progress in best practices for preventing parachute science through co-developing research with end-users in mind and demonstrating a commitment to Open Science, capacity building, and outreach.
- Running an inclusive international campaign and cultivating an ethical and high-trust team dynamic.
- Garnering support and participation from multiple local, regional, and national agencies and institutions on the ground in Africa.

The BioSCAPE team strongly supports the goals of PANGEA and is committed to contributing to its success. We look forward to the possibility of collaborating with the PANGEA team and seeing their accomplishments in advancing NASA's research objectives.

Sincerely,

Adam Wilson (PI) on behalf of the BioSCAPE leadership team: Erin Hestir (Co-PI), Jasper Slingsby (South African PI), and Anabelle Cardoso (Science Team Manager)



**COLUMBIA UNIVERSITY**  
IN THE CITY OF NEW YORK

Center for Climate Systems Research,  
Columbia University  
NASA Goddard Institute for Space Studies

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095, USA

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter is to confirm our support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If the field campaign as proposed is selected, PANGEA will fill a fundamental gap on the data needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with climate change and human activities, contributing towards an improved understanding of how tropical forests are responding to the rapid global changes. PANGEA's overarching goals are closely aligned to the endeavor of modeling global vegetation dynamics and land surface fluxes at NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS) in its earth system model, ModelE.

Demographic vegetation modeling (BiomeE) is a model development project within GISS ModelE that has been supported by the NASA Modeling, Analysis, and Prediction (MAP) program since 2020 (<https://map.nasa.gov/research/ROSES20/>). This project's main objective is to model global vegetation dynamics and its feedback to climate systems. Tropical forest ecosystems are a major component in this modeling effort.

We foresee the synergistic activities and opportunities for collaboration between the land modeling group at GISS and PANGEA. Both projects aim at improving the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings will improve the predictive skills of terrestrial biosphere models and quantify the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. We have submitted a proposal to NASA MAP 2024 on integrating observations across multiple scales with NASA GISS's demographic vegetation model (BiomeE) based on data assimilation and machine learning approaches to gain process-understanding of the main drivers of forest-savanna ecosystem state shifts in the tropical regions of South America and Africa. This topic is also an important objective for PANGEA.

We will look for possible ways for direct involvement with PANGEA should the field campaign be selected for improving the modeling of tropical forest ecosystem in GISS ModelE. We will

look for calls for proposals and funding opportunities from PANGEA and other programs (e.g., MAP, Carbon Science, and Biological Diversity & Ecological Conservation), and seek contributions that are related to the goals of PANGEA.

PANGEA is a critically important project that would significantly advance our scientific knowledge of the ecosystems that are still poorly represented in Earth system models. As the developer of the terrestrial ecosystem module in GISS ModelE, we would like to offer our enthusiastic support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration with PANGEA.

Sincerely yours,



Ensheng Weng  
Associate Research Scientist  
Center for Climate Systems Research, Columbia University  
NASA Goddard Institute for Space Studies  
2880 Broadway, New York, NY 10025, USA  
Email: [ew2560@columbia.edu](mailto:ew2560@columbia.edu), [ensheng.weng@nasa.gov](mailto:ensheng.weng@nasa.gov)  
Office: 212-678-5585  
<http://www.giss.nasa.gov/staff/eweng.html>



Benjamin Cook  
Research Physical Scientist  
NASA Goddard Institute for Space Studies  
2880 Broadway, New York, NY 10025, USA  
Email: [benjamin.i.cook@nasa.gov](mailto:benjamin.i.cook@nasa.gov)  
Office: 212-678-5669  
<https://www.giss.nasa.gov/staff/bcook.html>



**Prof. Paulo Artaxo**

Centro de Estudos Amazônia Sustentável  
Universidade de São Paulo



Phone: +[55] (11) 3091 7016

+55-11-991158970

e-mail: [artaxo@if.usp.br](mailto:artaxo@if.usp.br)

---

São Paulo, November 9, 2024

**To whom it may concern**  
**PANGEA letter of support**

The Center for Sustainable Amazonia Studies (CEAS) from the University of São Paulo (USP) is pleased to support the PANGEA proposal fully. This innovative approach will help us better understand the critical role that tropical forests play in the global climate. The Brazilian scientific community is eager to join PANGEA's efforts. We are running LBA, ATTO, FACE, and many large-scale experiments that are closely related to the PANGEA scientific agenda.

The University of São Paulo has recently set up a Center for Sustainable Amazonia Studies, which has more than 200 USP researchers from several areas. Our multidisciplinary approach is online with PANGEA, and we will be happy to help and support PANGEA activities.

The FAPESP Global Change Program, of which I am one of the coordinators, will also be happy to join forces. CEAS is already running several FAPESP Thematic projects, and integrating these different initiatives will benefit all of us.

We fully support PANGEA and are ready to help with the implementation plan, integrating our activities with this critical scientific agenda.

*Sincerely,*

Prof. Paulo Artaxo

Director, CEAS – Center for Sustainable Amazonia Studies



Elsa Ordway, PhD  
Forest Ecosystems & Global Change Lab  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research  
UCLA

05 December 2024.

**Support Letter for PANGEA (PAN Tropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation)**

We are writing to convey our enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, the PANGEA program will greatly enhance research activities in forest monitoring, climate change, and capacity building under the leadership of the Centre for International Forestry Research and the World Agroforestry Centre (CIFOR-ICRAF).

CIFOR-ICRAF is an international research organization focused on global issues, namely climate change, biodiversity, food, value chains, and equity. It is dedicated to producing research information to support decision-makers worldwide in improving well-being. Our scientists bring the latest research findings and analysis on forests, trees, and agroforestry to major global forums. CIFOR-ICRAF has offices in 26 countries and works on all six continents.

PANGEA's goals align closely with our ongoing efforts, addressing global challenges like deforestation and biodiversity loss, the climate crisis, inequity, unsustainable supply and value chains, and dysfunctional food systems. We are applicants for supporting PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in researching tropical forests, peatlands, and coastal ecosystems.

If PANGEA is selected, CIFOR-ICRAF can offer in-kind support through its extensive network and logistical structure in the three tropical basins. There is also the possibility to initiate resource mobilization from other sources to support joint activities with PANGEA, as it represents a project with significant potential impact.

As Chief Executive Officer at CIFOR-ICRAF, I fully support the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement will facilitate this valuable partnership, advancing our shared goals in climate mitigation, adaptation, and conservation, with a particular emphasis on forest ecosystems.

Sincerely,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "E. Ubalijoro", written over a horizontal line.

Dr. Eliane Ubalijoro

CEO of CIFOR-ICRAF



Linde Center for Global Environmental Science  
Division of Geological and Planetary Sciences

Mail Code 131-24  
Pasadena, CA 91125  
(626) 395-6143  
[tapio@caltech.edu](mailto:tapio@caltech.edu)  
[www.clima.caltech.edu](http://www.clima.caltech.edu)

10 September 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
Los Angeles, CA, 90095

Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)

Dear Dr. Ordway:

I am writing to express the Climate Modeling Alliance's (CliMA) strong interest in the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA) Scoping Campaign. We are excited by the potential of PANGAEA to advance our understanding of tropical forest ecosystems and their response to climate and anthropogenic changes. The alignment between PANGAEA's research objectives and CliMA's mission makes this an excellent opportunity for future collaboration and mutual benefit.

At CliMA, our core mission is to deliver actionable climate predictions to empower effective climate adaptation and mitigation planning. We are developing a next-generation Earth system model that leverages machine learning, data assimilation, and extensive ground and space-based observations. Our goal is to predict changes in critical climate phenomena such as droughts, heat waves, and extreme rainfall events, with a focus on providing accurate, localized information.

PANGAEA's focus on assessing the impact of global changes on tropical biogeochemical cycles and forest structure aligns with our research interests. We see tremendous potential in integrating high-resolution simulations from our Earth system model with on-the-ground and satellite data collected by PANGAEA. This synergy can enable us to quantify uncertainties, offer novel insights into ecosystem responses, and contribute to addressing PANGAEA's Science Question 1 regarding the similarities and differences in tropical forest biogeochemistry and structure.

Furthermore, the Earth observations gathered by PANGAEA would be invaluable for refining CliMA's models and improving our predictions of ecosystems under future climate scenarios. The opportunity to access data from underexplored tropical forest regions would be particularly beneficial in enhancing our understanding of and capabilities to model these critical ecosystems.

We are also enthusiastic about PANGEA's commitment to open science and capacity building in the Global South. CliMA shares these values and is dedicated to making our scalable, open-source modeling platform accessible to a wide range of stakeholders through cloud resources. We believe that fostering collaboration and providing user-friendly tools for real-world decision-making are essential for addressing the complex challenges posed by climate change.

We eagerly anticipate the outcomes of the PANGEA Scoping Campaign and are optimistic about the potential for future collaboration. Should the PANGEA program secure NASA funding, we would be keen to explore opportunities to leverage CliMA's modeling capabilities in support of PANGEA's research objectives.

Thank you for considering our perspective. We look forward to staying engaged with the PANGEA initiative and contributing to its success in the future.

Sincerely,



Tapio Schneider  
Theodore Y. Wu Professor of Environmental Science and Engineering  
Principal Investigator, CliMA



Dr. Renato K. Braghiere  
Research Scientist  
Land Modeling Lead, CliMA

## Congo Basin Science Initiative

c/o Congo Basin Water Resources Research Center  
Department of Natural Resources Management  
University of Kinshasa  
Bâtiment FOGRN BC  
Kinshasa  
Democratic Republic of Congo



Email: [info@congobasinscience.net](mailto:info@congobasinscience.net)

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

26 November 2024

Dear Dr. Ordway,

### **RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGAEA). If funded, PANGAEA will significantly advance scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities, via new data, methods, and techniques. The field campaigns will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. We co-chair the Congo Basin Science Initiative, which is closely aligned to PANGAEA's main goals.

The Congo Basin Science Initiative (CBSI) is a large network of scientists, led by those from the region, to understand the Congo Basin as a changing regional entity, train a new generation of scientists from the region, and deliver this new data and knowledge to policy makers and civil society. Our main source of funds is from the UK government, to implement the CBSI Science and Capacity Plan, which includes distributed data collection across the region including climate, hydrology, vegetation and biogeochemistry, biodiversity, land cover and land use change, and socio-ecological data, to understand the full climate-water-forest-society system.

CBSI and PANGAEA are inherently synergistic. For example, both PANGAEA and CBSI are working at the large-scale, but with complementary methods, PANGAEA focused more on airborne and spaceborne sensors and CBSI more ground-based and process-oriented data collection. Likewise, the ultimate aim of both endeavours is integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests.

Should PANGAEA be selected, CBSI will seek opportunities for close collaboration with PANGAEA. For instance, we will look for funding opportunities that are related to joint PANGAEA and CBSI goals.

We will also look to maximize the exposure of our cohort of PhD and MSc students from the region to NASA and wider US science.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As co-chairs of CBSI, we confirm our full support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between CBSI and PANGEA in the hopefully near future.

Sincerely,



Prof. Raphael Tshimanga  
Co-chair, Congo Basin Science Initiative  
Professor  
University of Kinshasa, DRC



Professor Simon L Lewis FRS  
Co-chair, Congo Basin Science Initiative  
Chair of Global Change Science  
University of Leeds, UK

Rik Van de Walle  
Rector

E rector@ugent.be  
T +32 9 264 30 01

Campus Ufo, Rectorate  
Sint-Pietersnieuwstraat 25  
BE-9000 Ghent  
Belgium

[www.ugent.be](http://www.ugent.be)

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095

DATE  
06 November 2024

PAGE  
1/3

OUR REFERENCE  
2024/RVDW/ddb/068

**Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express strong support of Ghent University for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data and fundamental research gaps related to the understanding and scaling of CO<sub>2</sub> (and other greenhouse gasses) and water fluxes in tropical forests, especially in Central Africa. PANGAEA will support and reinforce the data collection, modelling and more generally many of the research activities led and carried out at Ghent University by multiple colleagues, including Prof. P. Boeckx, Prof. M. Bauters, Prof. H. Verbeeck, Prof. W. Hubau and Dr. F. Meunier.

Furthermore, Ghent University is interested to become a member of the science planning team of PANGAEA. Ghent University is an internationally renowned public higher education institution of around 50,000 students and 16,000 employees. Our 11 faculties offer over 200 programs and conduct in-depth research in a wide range of scientific fields. Our credo is "Dare to Think", which encourages everyone to question conventional views and dare to take a nuanced position. We are a pluralistic university open to all, whatever their ideological, political, cultural or social background. Ghent University is also the first European university to start a campus on Incheon Global Campus in Korea. We are a Dutch-speaking university, but English is widely spoken by students and staff, and international students can choose from a wide variety of courses and programs in English.

## DATE

06 November 2024

## PAGE

2/3

## OUR REFERENCE

2024/RVDW/ddb/068

We see several aligned efforts and complementarities between Ghent University's activities in Central Africa and PANGEA, especially in relation to our unique activities in Yangambi, DR Congo, since 2010. In Yangambi we operate since 2020 the first eddy covariance flux tower (CongoFlux) for the Congo basin. CongoFlux follows ICOS protocols and is an associated tower to the ICOS network. We also coordinate a ground-based network of permanent 1 ha inventory plots as well as ForestGeo (1), GEM (4) and regrowth plots (5 chronosequences), ecosystem monitoring, terrestrial and airborne laser scanning, in Yangambi and in multiple other locations in DR Congo and other rainforest countries in Central Africa. We also have specific experience with dynamic vegetation models applied to the tropics, in particular to Central Africa. In addition, we have added tropospheric ozone and black carbon analyzers, FTIR for total column measurements of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and CO as well as solar induced fluorescence (SIF) sensors.

We and some organizations to which our colleagues are related (e.g., CongoFlux, the Congo Biogeochemical Observatory, the Congo Basin center of Excellence, and the center of excellence for the African Great Lakes' Natural Capital) look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observations and multidisciplinary data collection and methods to conduct research. We are particularly excited to strengthen via PANGEA the remote sensing component (e.g., LIDAR and hyperspectral data) at the CongoFlux site to allow scaling our observations. Hence, we look forward to the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen local capacity (both technicians and researchers) for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We have already pursued various sensitizing and capacity building initiatives with local communities, the National Institute for Agronomic Study and Research (INERA) in Yangambi, the Universities of Kisangani, Lubumbashi and Bukavu and Mountains of the Moon, as well as various national parks (Kahuzi-Biéga, Salonga, Rwenzori). Ghent University has been working in Yangambi for 15 years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with e.g., logistics for new data collection, the synthesis of ancillary data and the modeling of the ecosystems. We have a team of ca. 25 PhDs, 4 local professors and 5 technical staff in the Kisangani-Yangambi landscape.

Should PANGEA be funded, Ghent University can provide in-kind support in the form of data, local networks, logistics, and many other types of support that can be useful. Our team will also consider developing research proposals to seek funding to support participation in PANGEA-related studies.

In conclusion, our institution is one of the few international organizations actively collecting ground-based data in central Africa. We excel at collecting and analyzing different types of ground-based data, including eddy covariance data, plot inventories, wood and leaf trait data, at

DATE

06 November 2024

PAGE

3/3

OUR REFERENCE

2024/RVDW/ddb/068

strengthening capacity of local universities and government officials, and at engaging with local population via various sensitizing activities. We seek to further strengthen our capacities to link vegetation models, ground based, eddy covariance and remote sensing data to improve our understanding of pantropical carbon accounting and ecosystem functioning.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As Rector of Ghent University, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue these common interest and efforts.

Kind regards,



Rik Van de Walle  
Rector



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

7 November 2024

Dear Dr. Ordway,

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

I am writing to express strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of and Ecological Adaptation (PANGAEA). If selected, PANGAEA will fill critical data, methodological, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon cycle dynamics in tropical peatlands and their interactions more broadly with biogeochemical cycles, biodiversity, climate change and disturbance dynamics, human activities. PANGAEA will also support and reinforce future mapping activities particularly combining ground and Earth Observation data analysis led and carried out by CongoPeat.

CongoPeat is a collaboration between five UK Universities, Marien Ngouabi University in Republic of the Congo and the universities of Kisangani and Kinshasa in the Democratic Republic of the Congo, first established in 2012. Our goal is to understand the past, present and future function of the central Congo peatlands, and supply new knowledge to policy makers and civil society to enhance their long-term protection. To achieve our objectives, we have previously conducted diverse fieldwork across the 16.7 million hectare peatland region, published landmark studies (Dargie et al. 2017, Nature; Garcin et al. 2023 Nature; Hawthorne et al. Quaternary Science Reviews, Young et al. 2024 Global Change Biology), and assisted the establishment of a new law in Republic of the Congo protecting the peatlands from industrial use.

We currently have long-term activities in Ekolongouma (Republic of the Congo), Ossendo and Ossango (Republic of the Congo) and Lokolama (DRC) where we are installing a flux tower and other instrumentation with partners at University of Kisangani, University of Ghent, and University of Kinshasa. We are training a new generation of students in diverse aspects of peatland and wetland science, including 12 current students from Republic of Congo and DRC.

We see several aligned efforts and general aims between CongoPeat and PANGAEA, in particular in combining ground data and Earth Observation data to produce better maps of the peatlands; understanding the carbon balance of the peatlands; understanding methane fluxes from the peatlands, and modelling how these might change in the future.

We look forward to working together with PANGAEA and its efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly

excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics on peatland and wetland research to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGEA be funded, CongoPeat will try to align our research activities and assist PANGEA to understand how we can gain additional scientific insights from this. There will be no in-kind benefits from the Republic of Congo and DRC Universities or staff, as we do not have spare capacity or resources. The UK universities may provide in kind support depending on the details of the research programs to be determined, or we will consider developing research proposals where the Republic of Congo and DRC partners co-lead collaborations for win-win research in the Global South and Global North.

We believe that PANGEA is a very important project with the potential for high impact. As founder and Co-lead of CongoPeat, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort to understand the world's largest tropical peatland complex, and protect its 29 billion tonnes of stored carbon and world's highest densities of lowlands gorillas and forests elephants for the long-term.

Yours sincerely



Professor Simon L. Lewis FRS  
Chair in Global Change Science  
School of Geography  
University of Leeds  
Leeds. LS2 9JT. UK.  
**Tel:** +44 (0)113 343 3337  
**Email:** [s.l.lewis@leeds.ac.uk](mailto:s.l.lewis@leeds.ac.uk)





HARVARD

Faculty of Arts and Sciences

ORGANISMIC AND EVOLUTIONARY BIOLOGY

November 29, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing in support of the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA). If selected, PANGEA will address important knowledge gaps regarding the role of structurally and functionally diverse tropical moist forests on carbon, energy, water, and nutrient cycles. The proposed field campaigns will advance our knowledge on the risks of different tropical forest regions undergoing critical, potentially irreversible, transitions due to intensification of climate extremes and expansion of deforestation and forest degradation.

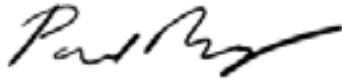
PANGEA's main objectives and vision are closely aligned to the modeling and model-data integration activities conducted by the Ecosystem Demography Model (ED2) team. The ED2 model is a process-based land-surface model that accounts for the dynamic, heterogeneous nature of forest structure and composition, and the resulting impacts of this heterogeneity on ecosystem function. ED2 has been used in multiple studies to answer scientific questions relating to the role of diverse forests in the Earth System, at scales ranging from a single site to entire continents. ED2 can provide mechanistic understanding and quantification of the role of tropical forest functional diversity on increasing the resilience of tropical forests to global change, which is one of the key PANGEA's overarching questions. Importantly, with respect to PANGEA's goals, ED2 has been extensively applied to: (i) study the dynamics of terrestrial carbon, water and energy cycles in tropical regions; (ii) determine and quantify the impacts of using new forms of terrestrial remote sensing observations – including, lidar and radar measurements of forest structure, imaging spectrometry-based measurements of forest composition, and microwave measurements of canopy and soil moisture – to constrain predictions of long-term, large-scale terrestrial ecosystem dynamics; and (iii) bench-marking predictions of terrestrial ecosystem dynamics, including several assessments in tropical regions.

The development and application of the ED2 modelling framework has been supported by multiple United States funding agencies over the past two decades. While NASA has been the primary supporting agency, the National Science Foundation and the Department of Energy have also provided support. Should PANGEA be selected for funding, the ED2 modeling group will seek out opportunities to directly engage with PANGEA activities, including submitting

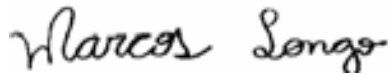
proposals to funding opportunities from the above US agencies that are related to PANGEA's overarching goals. We will also seek opportunities for contributing to capacity building and training of students on land-surface terrestrial ecosystem modeling, both within the US and in the tropics.

PANGEA is a timely and critically important project that will advance our current understanding of the resilience of tropical forests to on-going global environmental change. We enthusiastically support the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and look forward to exploring opportunities for collaboration between ED2 and PANGEA.

Sincerely,  
The ED2 model development team



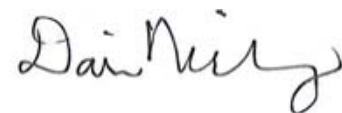
Paul R. Moorcroft  
Harvard University  
Professor of Organismic and Evolutionary Biology  
Faculty Affiliate, Environmental Science and Engineering Program, Harvard University  
Cambridge, MA 02138



Marcos Longo  
Research Scientist  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Climate and Ecosystem Sciences Division  
Berkeley, CA 94720



Ryan Knox  
Ecosystem Modeler  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Climate and Ecosystem Sciences Division  
Berkeley, CA 94720



David Medvigy  
Associate Professor  
University of Notre Dame

Department of Biological Sciences  
Notre Dame, IN 46556



Michael C. Dietze  
Professor  
Boston University  
Department of Earth & Environment  
Boston, MA 02215



Naomi M. Levine  
Professor  
University of Southern California  
College of Letters, Arts and Sciences  
Los Angeles, CA 90089



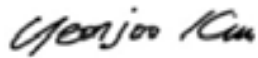
Abigail Swann  
Professor  
University of Washington  
Department of Atmospheric and Climate Science  
Seattle, WA 98195



Xiangtao Xu  
Assistant Professor  
Cornell University  
Dept. of Ecology and Evolutionary Biology  
Ithaca, NY 14853

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Hans Verbeeck', with a stylized, somewhat abstract shape.

Hans Verbeeck  
Associate Professor  
Ghent University  
Department of Environment  
B-9000 Gent, Belgium

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yeonjoo Kim', with a stylized, somewhat abstract shape.

Yeonjoo Kim  
Professor  
Department of Civil and Environmental Engineering  
Yonsei University  
Seoul, Korea.



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Ministério da Agricultura e Pecuária  
Embrapa Acre  
Rodovia BR-364, km 14, Caixa Postal 321  
CEP 69900-97 - Rio Branco-AC  
Telefone: (68) 3212-3200  
www.embrapa.br

Carta nº 109/2024-CPAF-AC/CHGE

Rio Branco, 04 de dezembro de 2024.

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Assunto: **Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)*. If funded, PANGAEA will significantly advance with data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon fluxes in tropical forests and/or their interactions with climate change and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGAEA's main goals are very aligned with similar activities conducted by Embrapa Acre/C-arouNd in Western Brazilian Amazon.

Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions - C-arouNd is a EJP that has been supported by Embrapa and international institutions since 2023 (<https://ejpsoil.eu/soil-research/second-external-call-international-call/c-around>). C-arouNd's goals include to investigate how short and long-term agricultural management practices affect SOM persistence in the soil profile and contribute to inclusion of the effects in national inventories to inform policy to reduce net greenhouse gas emissions and mitigate global change. We are currently investigating this persistence in tropical soil of Acre, Western of Brazilian Amazon at Rio Branco and Mâncio Lima, a regional scale.

Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and C-arouNd are interesting in tropical areas. Likewise, C-arouNd is producing field data that can be used to integrate observations across multiple scales with models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests and also agroecosystems, which complements PANGEA's overall objectives.

Should PANGEA be selected, the C-arouNd group will seek opportunities for close collaboration with PANGEA. For instance, We will look for funding opportunities that are related to PANGEA's goals.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. We confirm our intention to support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between Refining Soil Conservation and Regenerative Practices to Enhance Carbon Sequestration and Reduce Greenhouse Gas Emissions and PANGEA.

Sincerely,

Dr. BRUNO PENA CARVALHO  
Chefe-Geral da Embrapa Acre



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Pena Carvalho, Chefe-Geral**, em 04/12/2024, às 15:57, conforme art. 6º, parágrafo 1º do Decreto 8.539, de 8 de outubro de 2015.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site [https://sei.sede.embrapa.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.sede.embrapa.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0) informando o código verificador **11489040** e o código CRC **AB5C82E6**.



Colombo, December 2<sup>nd</sup>, 2024.

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). If funded, PANGAEA will significantly advance on data, training gaps/needs related to the greenhouse gases measurement in tropical forests, climate change and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGAEA's main goals are very aligned with to samples collection and greenhouse gases (CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub>) analysis, using chromatographs activities conducted by Embrapa Florestas.

I am interested in exchanging experience and learning about modeling with your team, also I can see future connections with my projects with alternative biomasses for energy, that can mitigate deforestation. Also, in a Project to produce gold bioextrator produced with leaves from an Amazon native tree that can be used also for mining forest recuperation areas. These projects are related with PANGAEA, once it can provide regional changes that that can have global impacts on carbon cycle dynamics and biodiversity loss.

PANGAEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. I confirm my utmost support for the PANGAEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for.

Sincerely,

Documento assinado digitalmente  
 **MARINA MOURA MORALES**  
Data: 04/12/2024 13:51:40 -0300  
Verifique em <https://validar.jti.gov.br>

Marina Moura Morales  
Embrapa Florestas  
Researcher Sustainable systems  
[marina.morales@embrapa.br](mailto:marina.morales@embrapa.br)  
+55 41 3675 5705 / +55 41 992087182

MARCELO FRANCIA  
ARCO  
VERDE:70842817972  
Assinado de forma digital  
por MARCELO FRANCIA  
ARCO VERDE:70842817972  
Data: 2024.12.03 16:07:52  
-03'00'

Marcelo Francia Arco-Verde  
Embrapa Florestas  
Main head  
[cnf.chgeral@embrapa.br](mailto:cnf.chgeral@embrapa.br)  
+55 41 3675 5610



**Subject: Esri Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly advance the application of existing and emerging geospatial technologies developed by Esri towards both social and environmental outcomes. PANGEA's focus on advancing carbon, biodiversity, and agricultural remote-sensing capabilities in the tropics perfectly aligns with Esri's demonstrated commitment to sustainable development initiatives and the conservation of biodiversity.

The Environmental Systems Research Institute, Esri Inc. is a global leader in Geographic Information Systems committed to advancing the understanding of our world through geographic technologies. Esri serves over 650K organizations worldwide who leverage our technology across a wide variety of industries. Our mission is to develop best of class technology, serve the communities using these tools and advance greater efficiencies, understanding and positive impacts for society and the environment.

Esri's primary technology framework, ArcGIS, provides considerable imagery and remote sensing management and analysis capabilities increasingly including emerging hyperspectral capabilities. A close partnership with PANGEA, if selected, would provide Esri an opportunity to exercise these existing and emerging capabilities for positive environmental and social impact. Esri provides complimentary and low-cost access to its technology for Education, Conservation, Humanitarian, and Disaster Response initiatives through formal programs serving tens of thousands of organizations globally. Alignment with PANGEA presents an opportunity for demonstrating the potential of emerging technologies and data sources to communities who can substantially benefit from a new class of geospatial information products and decision support solutions.

We are eager to work with PANGEA to practically apply and improve ArcGIS to further advance Earth observation capabilities. We strongly endorse PANGEA's collaborative and multidisciplinary approach to understanding tropical forest, peatland, and wetland responses to global environmental change to support the development of innovative and effective solutions.

If PANGEA is selected, ESRI can provide in-kind support through the access of Esri technology for key stakeholders including nonprofits, academic institutions and Local and Indigenous



Communities. Our team is also prepared to explore funding opportunities to formally participate in PANGEA-related research and applications activities through support from Esri Professional Services and our global network of partner organizations.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As the Director of Conservation Solutions at ESRI, I offer my full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our impact towards sustainable development, climate and biodiversity conservation goals.

David Gadsden

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "David Gadsden", written over a light gray horizontal line.

Director, Conservation Solutions  
Esri Inc.  
380 New York Street  
Redlands, California



Robert B. Jackson, Douglas Provostial Professor  
Department of Earth System Science  
School of Earth, Energy & Environmental Sciences  
Stanford, California 94305-4216

Phone: (650) 497-5841  
Fax: (650) 498-5099  
jacksonlab.stanford.edu

Dr. Elsa Ordway  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
UCLA

4 December 2024

Re: PANGAEA Application

Dear Dr. Ordway and the PANGAEA Team,

We are writing in support of your project “PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)” and to express our intent to collaborate with you on the project. We established and coordinate the FLUXNET-CH<sub>4</sub> network and we are currently establishing a network of new methane flux towers across the Amazon and into Africa, in collaboration with researchers in these regions. This includes eddy flux measurements in Brazil, Peru, French Guiana, and Botswana, as well as synthesis of data from flux towers across the South America, Africa and Southeast Asia. The tropics are a large and growing source of methane emissions, but measurements of these fluxes remain extremely limited. PANGAEA’s proposed work will fill this gap by providing new measurements locations and a platform to scale these findings with remote sensing.

We would welcome the chance to collaborate with you on PANGAEA. We see many synergies between our efforts and PANGAEA’s proposed work. For example, one of our major goals is synthesis of existing *in situ* methane flux data from tropical ecosystems. This will complement PANGAEA’s airborne campaigns and provide a valuable foundation to target new field measurements. Additionally, we have developed virtual training materials on methane flux data processing to improve data quality from tropical sites. A collaboration with PANGAEA would offer a platform to disseminate these resources more widely. In summary, if PANGAEA is selected for funding, we see many opportunities to align our research and training efforts to improve our understanding of tropical methane emissions.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Rob Jackson".

Robert B. Jackson  
Douglas Provostial Professor  
Department of Earth System Science  
Stanford University  
Stanford, CA 94305  
(650) 497-5841 (Ph)  
rob.jackson@stanford.edu

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Alison Hoyt".

Alison M. Hoyt  
Assistant Professor  
Department of Earth System Science  
Stanford University  
Stanford, CA 94305  
(650) 283-9862  
ahoyt@stanford.edu

**Rome, Italy 24 September 2024**

Dr Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of biogeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, training gaps and needs related to the measurement of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGEA will also support and reinforce several activities led and carried out by the Climate Change, Biodiversity and Environment Office of the United Nation Food and Agriculture Organization (FAO).

We see several aligned efforts and general aims between FAO and PANGEA, in particular, improving our understanding of the tropical forest biomes and all the land use change processes that are occurring in these regions. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGEA be funded, FAO can provide in-kind support in the form of data exchange, cooperation and direct/indirect participation to many projects occurring in the tropical regions. Our team will also consider supporting participation in PANGEA-related studies.

While our organization excels at strength (e.g. community engagement, collecting and analysing ground-based data, strengthening capacity of local government officials, etc.), we seek to engage in research activities such as, "leveraging satellite imagery to improve carbon cycle assessment".

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As leader of the Climate Action Support Team in the Office of Climate Change, Biodiversity and Environment (OCB), I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort.

A handwritten signature in dark ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Martial Bernoux  
Senior Natural Resources Officer  
Climate Action Support Team  
Office of Climate Change, Biodiversity and Environment (OCB)  
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)  
Viale delle Terme di Caracalla, 00153 Rome, Italy



# Forest Global Earth Observatory

*Smithsonian Tropical Research Institute*

6 December 2024

To: Dr. Elsa Orway  
PANGEA Lead, Forest Ecosystems & Global Change Lab  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research  
UCLA

**RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am pleased to provide my strong support for your NASA proposal entitled “*PAN-tropical bioGeochemistry Airborne Experiment in Africa and the Americas (PANGEA)*.” This is an extremely important initiative that will lead to a huge leap in understanding of how tropical forests are and will respond to the combined effects of climate and land-use change.

As Director of the Forest Global Earth Observatory (ForestGEO) at the Smithsonian Institution, I am excited to contribute to this research effort through ForestGEO activities across the tropics. Leveraging the long-term site-based monitoring of tropical forests by ForestGEO partners over the past 40 years, will advance the goals of PANGEA and will be hugely beneficial to ForestGEO's goals of tropical forest science and capacity sharing and strengthening.

Please feel free to contact me if you require any further information.

Yours sincerely,

Stuart J. Davies  
Frank H. Levinson Chair in Global Forest Science  
Director, Forest Global Earth Observatory (ForestGEO)  
Smithsonian Institution  
[www.forestgeo.si.edu](http://www.forestgeo.si.edu)  
[daviess@si.edu](mailto:daviess@si.edu)

School of Geography  
University of Leeds  
Leeds LS2 9JT  
U.K.

+44 (0) 113 34 36832 (direct)  
Email: o.phillips@leeds.ac.uk



**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

21st November 2024

Dear Dr. Ordway,

I write to express my enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly enhance the understanding of Earth's most precious ecosystems. It will also help support the work of many tropical partners of ForestPlots.net, connecting them better to the remote-sensing community.

ForestPlots.net is a global collaboration of many networks and almost 3,000 scientists engaged in measuring, monitoring and analysing the world's tropical forests. Our primary aims are to connect people measuring forests on the ground, to fund fieldwork in tropical countries, and to support our tropical partners so they can manage their data effectively and engage equitably in global science.

Several of PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at ForestPlots.net, perhaps especially in central Africa where we have received new funding recently from the Central African Forest Initiative (CAFI) to support AfriTRON partners in their long-term forest measurements. We are eager to support PANGEA's collaboration with the forest plot community to advance equitable collaboration, integrate of field measurements and knowledge with Earth observation, and develop a multidisciplinary approach to research in tropical forests, peatlands, and wetlands.

ForestPlots.net partner scientists are interested in diverse themes, such as tree mortality and its drivers, pan-tropical biodiversity and ecosystem function patterns and processes, and forest resilience to climate change. Our contributing networks are grounded in local partnerships, and especially active in Amazonia and tropical Africa. These partnerships and the deep knowledge of tropical forest ecosystems embedded in the ForestPlots.net community will facilitate PANGEA's objectives as this

expertise and ForestPlots.net's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGEA's implementation across the tropics.

If PANGEA is selected, we are interested to explore funding opportunities so our partners can directly participate in PANGEA-related research and applications activities. We see opportunities in PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, connecting our partners' work to help them collaborate with this community, and generating new sources of funding to support the vital fieldwork which underpins the calibration and validation of remote-sensors and their products.

I strongly believe that PANGEA represents a project with high potential impact. As Coordinator of the global ForestPlots.net initiative and the RAINFOR network in Amazonia, and Chair in Tropical Ecology at the University of Leeds, I therefore offer my full support for the PANGEA campaign. I hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared goals on climate mitigation and adaptation goals and globally-equitable science, with a particular emphasis on resilient forests and locally led solutions.

Yours sincerely

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'O' followed by a series of loops and a long horizontal stroke extending to the right.

Professor Oliver Phillips  
Chair in Tropical Ecology  
University of Leeds  
School of Geography  
Leeds, UK  
(44) 113-343-6832  
[www.rainfor.org](http://www.rainfor.org)  
[www.ForestPlots.net](http://www.ForestPlots.net)  
[o.phillips@leeds.ac.uk](mailto:o.phillips@leeds.ac.uk)



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGAEA will also support and reinforce Gabonese national forest characterization and monitoring activities already led and carried out by AGEOS.

AGEOS is a government agency that was established in 2010 in Gabon (<http://ageos.ga/>). Our goal is to involve in the implementation of the Government's policy on the acquisition, analysis and availability of data from space observation of the national land for the sustainable management of the environment, natural resources, land use, regional planning, research and innovation. To achieve our objectives, we develop a national strategy for space observation activities ; manage the space infrastructure ; ensure the monitoring and evaluation of the implementation of public policies (roads, housing, energy, natural resources, etc.) ; provide data related to climate change and promote training, research and capacity building in earth observation tools.

We see several aligned efforts and general aims between AGEOS and PANGAEA, in particular in biogeochemical cycles and carbon dynamics, ecosystem structure, function and biodiversity and climate feedbacks and interactions.

We look forward to supporting PANGAEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

While our organization/institution excels at analyzing remote sensing data and collecting ground-based data, we seek to engage in leveraging satellite imagery (data), data collection method and capacity building (advanced level) planned in PANGAEA framework to improve carbon accounting.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As [General Director of AGEOS, I express my utmost support for the PANGAEA campaign and hope that NASA's support of PANGAEA will enable us to pursue this common interest/activity/effort.



Aboubakar MAMBIMBA NDJOUNGUI  
General Director  
AGEOS  
NKOK Special Economic Zone (ZES) - Plot R27- PK27  
Gabon



2 December 2024

To: Dr. Elsa Orway  
PANGAEA Lead  
Forest Ecosystems & Global Change Lab  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
Congo Basin Institute | Center for Tropical Research  
UCLA

**RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our enthusiastic support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGAEA). If selected, PANGAEA will significantly advance understanding of the role of tropical forests in the earth system. It will also benefit and be synergistic with the recently established GEO-TREES initiative.

GEO-TREES is a ground-based reference system for the calibration and validation of earth observation satellite estimates of forest carbon. GEO-TREES is working with hundreds of partners across the world's forests to establish a representative network of permanent reference sites. This involves ground plots, terrestrial laser scanning, and airborne laser scanning at each site, and is underpinned by significant investments in training and capacity sharing. Our initial goal is to establish 100 core reference sites globally, with at least 60 sites in tropical forests.

Several of PANGAEA's goals align closely with ongoing efforts at GEO-TREES, particularly in understanding current and future changes in tropical forest dynamics and functioning. We are eager to support PANGAEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in research in tropical forests, peatlands, and wetlands that span intact to disturbed forests. We see a particular opportunity for PANGAEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further GEO-TREES goals through the incorporation of biodiversity monitoring in tropical forests.

If PANGAEA is selected, GEO-TREES will endeavor to support PANGAEA research and training initiatives at sites across the tropics. We would also welcome the opportunity to explore funding opportunities to participate in PANGAEA-related research and applications activities. The longstanding experience of the GEO-TREES leadership team and partner sites and networks across the tropics will be of strategic importance to PANGAEA's objectives.

On behalf of the GEO-TREES Executive Board, we offer our full support to the PANGEA campaign. We believe PANGEA represents a project with high potential impact, and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate mitigation and adaptation goals.

Yours sincerely,



Stuart J. Davies  
Frank H. Levinson Chair in Global Forest Science  
Director, Forest Global Earth Observatory (ForestGEO)  
Smithsonian Institution  
[www.forestgeo.si.edu](http://www.forestgeo.si.edu)



Jérôme Chave, CNRS  
UMR5300 Centre de Recherche sur la Biodiversité et l'Environnement,  
CNRS, INPT, IRD, Université de Toulouse, France  
<https://jeromechave.github.io/>



December 4, 2024

Re: PANGEA letter of support

To whom it may concern:

I am writing in support of the PANGEA research campaign and its goals of discovering the impacts of climate and land-use change on the world's humid tropical forests, focusing on the Americas and Africa. Our GLAD (Global Land Analysis and Discovery - [glad.umd.edu](http://glad.umd.edu)) laboratory at the University of Maryland generates the annual global forest loss maps that are the core data set of the Global Forest Watch ([globalforestwatch.org](http://globalforestwatch.org)) program, and much of our work is focused on humid tropical forests. By definition, primary humid tropical forests are a finite resource. Our data show an increasing rate of loss for this invaluable, and non-renewable, environmental asset. The outcomes of deforestation are well documented, including carbon emissions, biodiversity loss, and local and global downstream climate impacts. Change in humid tropical forests used to be predominantly mechanical extraction/clearing. Increasingly, we see fires consuming rainforests. Whether accidental or intentional, practically all rainforest fires are human set and track with climate anomalies. What is clear is that land use and climate change have made the rainforests more likely to burn, and we are in critical need of understanding and mitigating this dynamic. The list of interventions is long, but must be informed by science. Without such action, per the concept of the tipping point, humid tropical climate systems may change states and lead to the conversion of rainforests without any direct human action.

All of this is to say that PANGEA fits the need and call for action. The proposed field campaign will help us understand the differences and commonalities between rainforests, building a data-driven framework that advances our monitoring, modeling, and possible mitigation of the effects of large-scale climate and land use change on rainforests.

Our work at GLAD is a ready input to this effort. While we work pan-tropically, we also partner with national governments, NGOs and universities. Our capacity building efforts advancing land remote sensing in the tropics, whether supporting national reporting with the forestry agencies of the Democratic Republic of the Congo and Republic of Congo, or in a scientific advisory capacity with MapBiomas in Brazil, constitute a host of in place partnerships ready to synergize with PANGEA.

Please, use this letter as evidence of my unqualified and enthusiastic support for PANGEA and its comprehensive and ambitious plan to advance our understanding of current rainforest dynamics in helping to mitigate future rainforest loss.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to be "M Hansen".

Matthew Hansen  
[mhansen@umd.edu](mailto:mhansen@umd.edu)  
University of Maryland, Professor



**BOLIVIA** Pando, Santa Cruz, Tarija | **BRAZIL** Acre, Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins | **COLOMBIA** Caquetá | **CÔTE D'IVOIRE** Bélière, Cavally | **ECUADOR** Pastaza, Morona Santiago, Zamora Chinchipe | **INDONESIA** Aceh, Central Kalimantan, East Kalimantan, North Kalimantan, Papua, West Kalimantan, West Papua | **MEXICO** Campeche, Chiapas, Jalisco, Oaxaca, Quintana Roo, Tabasco, Yucatán | **NIGERIA** Cross River State | **PERU** Amazonas, Huánuco, Loreto, Madre de Dios, Piura, San Martín, Ucayali | **SPAIN** Catalonia | **USA** California, Illinois

November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

On behalf of the Governors' Climate and Forests Task Force (GCF Task Force), we are writing to express our ongoing support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical needs in terms of data, capacity building, and improved understanding of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, and human activities. PANGAEA also has significant potential to support and reinforce forest protection and land use governance efforts led and carried out by member jurisdictions of the GCF Task Force.

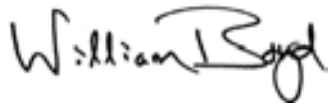
Established in 2009, the GCF Task Force is a unique coalition of 43 states and provinces from 11 countries working to establish and enhance jurisdiction-wide approaches to reducing deforestation and promoting sustainable land use. We work directly with the Governors, Secretaries, and civil servants in our member states and provinces as well as with their partners from civil society, Indigenous and local communities, academia, and the private sector to develop innovative, collaborative approaches to the problems of deforestation and climate change.

We see several aligned efforts and general aims between the GCF Task Force and PANGAEA, particularly helping to ensure close collaboration between researchers, data scientists, and land use decisionmakers. To that end, we were pleased to co-sponsor a PANGAEA scoping [workshop](#) in Lima, Peru in June 2024. Technical civil servants from GCF Task Force member jurisdictions in Bolivia, Colombia, Ecuador, and Peru, together with academic researchers from these same countries, convened to learn about PANGAEA and to provide insight into how improved data, methods, and applications from this field campaign could support both scientific and forest governance advancements on the ground.

The GCF Task Force was an early advocate for the proposal to design the PANGEA scoping study (see attached support letter), and we look forward to continuing to support PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. Should PANGEA be funded, we are particularly excited at the prospect of increasing the engagement of diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices. We hope to leverage our network of policymakers, technical staff, and partners from across our 43 member states and provinces to use PANGEA products and participate in capacity building activities.

We believe this is an important project with the potential for high impact. We look forward to working with you and your team and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort together.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "William Boyd". The signature is fluid and cursive, with the first and last names clearly legible.

William Boyd  
Project Lead

A handwritten signature in black ink that reads "Jason Gray". The signature is stylized and cursive, with the first and last names clearly legible.

Jason Gray  
Project Director

Attachment: Support Letter for Scoping Studies



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter is to affirm my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGAEA). If the PANGAEA field campaign is selected for funding, it will fill important knowledge gaps on how biodiverse tropical moist forests impact the energy, water and carbon cycling at local, regional, and global scales. It will also obtain calibration data for the new generation of satellite sensors at historically undersampled areas, and provide a unique opportunity to train and build research capacity in tropical regions. PANGAEA will also be synergistic to Guyaflux activities led and carried out by INRAE in French Guiana.

Guyaflux (GF-Guy), located at the Paracou field station in French Guiana, is a long-term research program led by INRAE and funded by INRAE and various European contracts since 2003 (<https://paracou.cirad.fr/website/experimental-design/guyaflux-tower>). Guyaflux aims at analyzing the impact of environmental conditions, particularly climate change, on greenhouse gas fluxes between the tropical rainforest ecosystem and the atmosphere. The Guyaflux site has power (solar panels) and wooden houses that may facilitate collaborations with PANGAEA. Participants of PANGAEA will also have access to labs located at INRAE's research center at Kourou (45-min drive from Paracou field station).

There are multiple highly aligned goals between Guyaflux and PANGAEA. For example, both projects seek to understand the impacts of climate variability and climate extremes on the resilience of tropical moist forests. We also share the same vision on the need of integrative approaches that combine field observations, remote sensing and models to better understand how tropical forests are responding to climate change.

Should PANGAEA be selected, the Guyaflux team will consider applying for funding opportunities that are synergistic with PANGAEA, to advance direct collaboration with PANGAEA and expand international partnerships.

PANGEA will be an extremely important project for filling critical knowledge gaps in highly biodiverse yet vulnerable tropical moist forests, and for building a long-lasting local research capacity in the tropics. As the PI and scientific head of the Guyaflux site, I express my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with Guyaflux.

A handwritten signature in blue ink, reading "D. Bonal", with a horizontal line underneath.

Dr. BONAL Damien

Senior Scientist

INRAE

UMR SILVA, 54180 Champenoux, France



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter is to affirm my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGAEA). If the PANGAEA field campaign is selected for funding, it will fill important knowledge gaps on how biodiverse tropical moist forests impact the energy, water and carbon cycling at local, regional, and global scales. It will also obtain calibration data for the new generation of satellite sensors at historically undersampled areas, and provide a unique opportunity to train and build research capacity in tropical regions. PANGAEA will also be synergistic to Guyafor activities led and carried out by Cirad in French Guyana.

Guyafor network (GF-Guy) is a long-time survey program of experimental forest plots led by Cirad and funded by Cirad and various French and European fundings since 1984 (<https://paracou.cirad.fr/>). Guyafor network aims at assessing the response of guyanese forests dynamics, structure and functioning to climatic variability and logging practices. We currently integrate regular forest inventories, botanical identification, environmental data and remote sensing data at the scale of experimental stations across the territory and at regional scale in french guyana. Within the Guyafor network, Paracou station has power and wooden houses that may facilitate collaborations with PANGAEA, and the UMR EcoFoG labs are accessible in Kourou (45-min drive from the Paracou station).

There are multiple highly aligned goals between Guyafor and PANGAEA. For example, both

projects seek to understand the impacts of climate variability and climate extremes on the resilience of tropical moist forests. We also share the same vision on the need of integrative approaches that combine field observations, remote sensing and models to better understand how tropical forests are responding to climate change.

Should PANGEA be selected, the Guyafor team will consider applying for funding opportunities that are synergistic with PANGEA, to advance direct collaboration with PANGEA and expand international partnerships.

PANGEA will be an extremely important project for filling critical knowledge gaps in highly biodiverse yet vulnerable tropical moist forests, and for building a long-lasting local research capacity in the tropics. As the PI of Paracou station and among scientific coordinators of Guyafor network, I express my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with Guyafor.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Mirabel', with a stylized, flowing script.

Dr. MIRABEL Ariane  
Researcher  
Cirad  
UMR EcoFoG, 97310 Kourou, France

To  
Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Dr. habil. Werner Leo Kutsch**  
Director General  
Integrated Carbon Observation  
System (ICOS ERIC)  
Email: [werner.kutsch@icos-ri.eu](mailto:werner.kutsch@icos-ri.eu)

Helsinki, 15 November 2024

Dear Dr. Ordway,

**Subject: Letter of Support for the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data and methods gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests. PANGEA will also support and reinforce international research, training, and data collation activities led and carried out by ICOS.

The Integrated Carbon Observation System (ICOS) is a distributed Research Infrastructure to generate high-precision data and integrate knowledge on the carbon cycle and greenhouse gas (GHG) budgets and of their perturbations. ICOS conducts long-term observations in three networks – atmosphere, ecosystems, and oceans – as required to understand the present state and extrapolate to the future behaviour of the global carbon cycle and GHG fluxes. ICOS has an increasing role in scientific support of climate policy.

ICOS has a number of activities ongoing in Africa, in particular with one Ecosystem Associate station (Yangambi in the Democratic Republic of Congo) and the Atmospheric station in La Réunion, and in French Guiana with the Associated Ecosystem station GuyaFlux. In addition, ICOS coordinates an EU project that has the aim to design an environmental Research Infrastructure in Africa (<https://kadi-project.eu/>).

We see a number of aligned efforts and general aims between ICOS and PANGEA, in particular in advancing research that leverages satellite imagery to advance methods to scale fluxes, and to validate and calibrate remote sensing products using the data collected at the flux towers. The ICOS Ecosystem stations have long histories of data being used for Cal/Val and model benchmarking, and a set of standardized tower-based remote sensing data are being implemented in the ICOS network, including FAPAR, canopy thermal measurements and imaging, phenology cameras and spectral data. PANGEA would help to fill spatial gaps thanks to the extensive use of remote sensing data (including the European satellites) and help to build a consistent and robust link between local scale field measurements and large scale continental and global products.

The collaboration between ICOS and PANGEA will improve accessibility to high quality carbon cycle data and can develop common or coordinated training initiatives and material for the next generation of scientist, in particular on the scalability of in situ measurements using high quality remotely sensed data. The plan of PANGEA in extending training material and activities in Portuguese and French languages would make the training more effective and accessible in the target areas of Africa and South America.

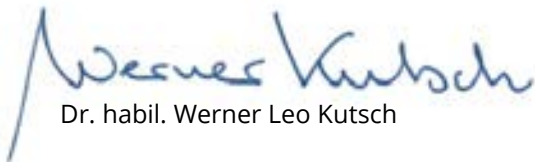
Should PANGEA be funded, ICOS will be excited to coordinate activities, and support PANGEA through the ICOS stations in tropical regions, the ICOS Ecosystem Thematic Centre and the ICOS Head Office

and Carbon Portal. Among the activities, ICOS will continue to perform rigorous eddy covariance data processing and distribution services, including for possible new sites in Africa, and evaluate the extension of measurements and products as funding availability allows. ICOS will also consider developing research proposals to seek funding to support participation in PANGEA-related scientific and training activities.

We recognize the mutual benefits in coordinating with PANGEA and sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of tropical terrestrial ecosystems and better leverage Earth observation datasets to support our Research Infrastructure goals. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for the research and understanding in the carbon cycle, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

We believe that this is an important project with the potential for high impact. As the Director General of ICOS, I express my utmost support on behalf of the PANGEA campaign scoping team and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Yours sincerely,



Dr. habil. Werner Leo Kutsch



**International mailing address**

IITA Ltd, Suite 32  
5th floor, AMP House  
Dingwall Road  
Croydon  
CR0 2LX

**Headquarters**

PMB 5320, Oyo Road, Idi-Oshe  
Ibadan, Nigeria  
Tel.: +1 201 6336094  
+234 700 800 4482  
Fax.: +44 (208) 711 3786 (via UK)

14 November 2024

Co-Director,  
Centre for Tropical Research and Congo Basin Institute  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
410K Botany Building  
University of California  
Los Angeles, CA 90095.

Dear Dr. Ordway,

**RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

I am writing to express the support of the International Institute of Tropical Agriculture (IITA) for the proposed National Aeronautics and Space Administration (NASA) Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of remote sensing data in tropical forest regions. This aligns well with IITA's mission to offer a leading research partnership that facilitates agricultural solutions to hunger, poverty, and natural resource degradation throughout sub-Saharan Africa.

IITA leads the One CGIAR's African continental agenda and operates in twenty-one (21) research stations in Africa covering sixteen (16) countries, including multiple stations in the Congo Basin covering Burundi, Cameroon, Central African Republic, Chad, Republic of Congo, DR Congo (DRC), Equatorial Guinea, Gabon, Rwanda, and São Tomé and Príncipe. IITA's operations focus on Research for Development (R4D) and Partnerships for Delivery (P4D), a structure designed to bridge the gap between research and its deployment in Africa. Through partnerships with governments, development partners, and communities, IITA deploys successful technologies and methods to sustainably advance food security in Africa.

As a leading organization focused on conducting research and deploying advances to address food insecurity, we anticipate partnering to use data and methodological improvements from PANGAEA through an Earth Science to Action (ES2A) framework. Specifically, improved remote sensing data from the tropics could be leveraged as part of the One CGIAR Sustainable Farming program, a multi-institutional initiative on sustainable food production, with a focus on sub-Saharan Africa. Specifically, the PANGAEA initiative aligns perfectly with IITA's programs on breeding for resilient crops under the genetic innovation research area, plant health, natural resource management and mixed crop agronomy under the resilient farming systems research area, as well as the climate adaptation under the system transformation research area. Methodological improvements from PANGAEA offer opportunities to remotely track the impact of agronomy interventions on crop yields, significantly increasing our ability to measure the uptake and impact of new agronomic inputs and methods. We also anticipate using findings from PANGAEA to advance climate-smart agriculture, and better understand the impacts of climate change on crop productivity.



#### International mailing address

IITA Ltd, Suite 32  
5th floor, AMP House  
Dingwall Road  
Croydon  
CR0 2LX

#### Headquarters

PMB 5320, Oyo Road, Idi-Oshe  
Ibadan, Nigeria  
Tel.: +1 201 6336094  
+234 700 800 4482  
Fax.: +44 (208) 711 3786 (via UK)

Remote sensing is a particularly powerful tool in a region like Central Africa, where the vast majority of farmers are smallholders, many of whom live in relatively remote areas. Improved remote sensing capabilities, and in particular improved resolution that allows remote research on parcels of less than 1 ha, offer significant promise to improve our ability to understand and improve food production in the region. Improved resolution on multiple scales is also needed to understand the interrelation between smallholder farms and forest loss and to reliably track land use changes at scale in the region.

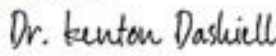
PANGAEA initiative is led by the University of California, Los Angeles (UCLA) with which IITA has established an initiative named Congo Basin Institute (CBI) that aims to integrate the dual goals of biodiversity and forest conservation while improving local community livelihoods. Since 2015, CBI has developed various initiatives aiming at connecting agricultural improvement activities with biodiversity and forest conservation to achieve more efficient traits that will maintain yield under heterogeneous environments. The PANGAEA initiative will then be a unique opportunity for this partnership to further produce an impact on the needs to feed the growing population while conserving forest cover and biodiversity in the Congo Basin region that harbors the second-largest rainforest in the world, representing 30% of the global forest area, and that faces accelerated degradation due to multiple pressures among which poorly practised agriculture alone contributes up to 84% of the forest cover loss.

If selected, we look forward to supporting PANGAEA's efforts to leverage earth observation and multidisciplinary data and methods in ways that align with these IITA efforts. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for improved food security, climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Should PANGAEA be funded, IITA expects to use the resulting data and methodologies to inform our research to sustainably improve food security in Africa and to monitor the deployment of those technologies. Our team also plans to develop research proposals to seek funding to apply PANGAEA's data and methodologies to improve food security in Central Africa.

We believe this is an important project with the potential for high impact. As the Deputy Director General, Partnership for Delivery of IITA, I express my utmost support for the PANGAEA campaign and hope that NASA's support of PANGAEA will enable us to collaboratively pursue these common interests.

Yours Sincerely,

Signed by:  
  
4CB8BD4F08234C8...

Dr. Kenton Dashiell  
Deputy Director General Partnerships for Delivery



**“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”**

Pucallpa, 10 de setiembre de 2024

**CARTA No. 149-2024-MRA-PMRA**

Señores

**ADMINISTRACIÓN NACIONAL DE AERONÁUTICA Y EL ESPACIO – NASA**

Presente. -

**ASUNTO: APOYO A LA INICIATIVA PANGEA**

Por medio de la presente, me complace dirigirme a ustedes a fin de saludar la posibilidad de impulsar la iniciativa PANGEA por parte de la NASA, la misma que permitiría realizar una campaña de investigación de campo de largo a nivel de la Amazonía.

En el Perú, los gobiernos subnacionales de la Amazonía hemos conformado la Mancomunidad Regional Amazónica – MRA y pertenecemos a la plataforma de los Gobernadores por el Clima y los Bosques – GCF Task Force (por sus siglas en inglés) que agrupa a 43 gobiernos subnacionales a nivel global, incluyendo a los gobiernos subnacionales de Pastaza, Morona Santiago y Zamora Chinchipe de Ecuador; Caquetá en Colombia; Pando, Santa Cruz y Tarija de Bolivia; Maranhão, Amapá, Tocantins, Pará, Roraima, Mato Grosso, Amazonas, Rondonia y Acre de Brasil; y Amazonas, Huánuco, Loreto, Madre de Dios, Piura, San Martín y Ucayali del Perú.

Actualmente en mi calidad de Gobernador Regional de Ucayali en Perú, soy Presidente de la Mancomunidad Regional Amazónica del Perú, representando 7 gobiernos subnacionales peruanos y presido actualmente también la plataforma del GCF Task Force, representando a 43 gobiernos subnacionales, de los cuales 22 pertenecen a la Amazonía en 5 de los países amazónicos.

Los gobiernos subnacionales, especialmente los de la Amazonía somos conscientes de que los bosques tropicales están experimentando cambios climáticos dramáticos, se ha incrementado la pérdida de biodiversidad y hay cada vez mayor presión por cambios en el uso de la tierra, sin que contemos con las capacidades y la información necesaria para hacer frente a estos desafíos.

Los cambios en la dinámica del flujo de carbono, el ciclo del agua, los eventos climáticos extremos y las migraciones de las especies están generando cambios importantes que afectan la vida y la producción de alimentos, lo cual pone en riesgo la seguridad alimentaria de nuestras poblaciones, especialmente de pueblos indígenas que habitan nuestra Amazonía.



**“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”**

La Amazonía es reconocida en el mundo entero por ser megadiversa y por ello altamente vulnerable al cambio climático y aunque los ecosistemas de bosques tropicales están mostrando evidencia de respuestas de adaptación frente al mismo, no conocemos a profundidad que está sucediendo y cómo podríamos contribuir con este proceso de forma más eficiente y urgente.


Consideramos que la iniciativa PANGAEA nos serviría para impulsar mejoras continuas en la ciencia de la teledetección, la recopilación de datos y la aplicación de esta ciencia para mejorar la gobernanza forestal, la planificación territorial, los esfuerzos de comando y control, la lucha contra incendios, combate a las economías ilegales y otras acciones críticas en el territorio.

Estamos comprometidos con la iniciativa PANGAEA para mejorar la comprensión a través de sus tres pilares:

- *Utilizando la ciencia para avanzar en la comprensión de cómo las regiones de bosques tropicales responderán de manera diferente al cambio global.*
- *Desarrollando capacidades en nuestros científicos de las regiones amazónicas para que puedan liderar estos esfuerzos científicos.*
- *Actuando con mejores capacidades de teledetección satelital para mapear y monitorear el carbono, la biodiversidad y la agricultura.*

Esperamos que la NASA tenga a bien seleccionar la iniciativa PANGAEA y esperamos poder contribuir desde nuestros gobiernos subnacionales en el trabajo de campo que pueda ser realizado, estamos seguros de que la recopilación de datos de sensores remotos aéreos, el uso de sensores remotos satelitales y modelos para comprender mejor la dinámica de los bosques tropicales contribuirán a una mejor gestión de los bosques brindándonos evidencia científica para tomar mejores decisiones de política pública.

Atentamente,



Manuel Gambini Rupay

Presidente de la Mancomunidad Regional Amazónica del Perú  
Presidente del Grupo de Gobernadores por el Clima y los Bosques

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

15.11.2024

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

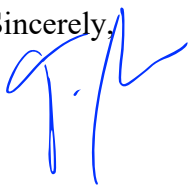
Dear Dr. Ordway,

This letter indicates my support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)*. PANGEA will significantly advance the science and data to understand and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. Combined with land use change mapping initiatives such as the ones produced by the MapBiomass Network, this may be a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use.

I see a lot of potential for synergies with lots of positive feedback when MapBiomass and PANGEA spreads across Latina America, Congo Basin and Southeast Asia. It is especially important for ensuring local capacity across the board to generate timely, accurate and relevant information about the tropics.

I look forward to the collaboration and generation of lots of fruits!

Sincerely,



Tasso Azevedo  
General Coordinator  
MapBiomass Network



**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGAEA). If selected, PANGAEA will significantly enhance/advance/benefit several NASA Harvest-led initiatives including: agricultural climate risk assessments, environmental health research, agricultural insurance for sustainable farming transitions, and climate finance frameworks.

NASA Harvest is NASA's Global Food Security & Agriculture program, established in 2017, and led and implemented by the University of Maryland, College Park. Harvest is committed to advancing Earth observations for agricultural decision-making and food security. Our network of over 45 leaders in agriculture and Earth observation works across public, private, NGO, and humanitarian sectors. Our team pursues objectives that include improving crop yield forecasting, enhancing early warning systems for food security, and advancing satellite-based agricultural monitoring through active projects in Africa, Southeast Asia, and Latin America.

Several of PANGAEA's objectives directly align with NASA Harvest's priorities, particularly in mapping and monitoring agricultural expansion and intensification in tropical forest regions, advancing methods to track carbon stocks and fluxes in agricultural-forest landscapes, improving crop type, yield, and condition monitoring capabilities using new satellite sensors, and supporting agricultural adaptation to climate change through enhanced monitoring.

NASA Harvest can provide valuable support through our ground validation data from agricultural monitoring sites, local logistics and community engagement through regional partners, technical expertise in agricultural remote sensing and machine learning, and access to our global network of food security stakeholders. The integration of PANGAEA's forest measurements with agricultural observations will be transformative for understanding tropical land-use dynamics.

The integration of PANGAEA's forest measurements with agricultural observations will be transformative for understanding tropical land-use dynamics. As NASA Harvest's Director, I enthusiastically support PANGAEA and believe it will significantly advance our shared goals of sustainable agriculture and food security.



[www.nasaharvest.org](http://www.nasaharvest.org)



We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director at NASA Harvest, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared food security and climate mitigation and adaptation goals.

Sincerely,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Inbal Becker-Reshef".

Inbal Becker-Reshef  
NASA Harvest, Director  
University of Maryland  
2181 Lefrak Hall, College Park, MD 20742





Professor Elsa Ordway  
618 Charles E. Young Drive S.  
Los Angeles, CA 90095

21<sup>h</sup> November, 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are pleased to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, the PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA has the potential to significantly advance our understanding of tropical forest resilience, climate impacts, and biodiversity conservation, with Gabon serving as a pivotal region, as led by the Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique (CENAREST).

Established in 1976, CENAREST is Gabon's national center for scientific and technological research, committed to fostering innovative research for sustainable resource management and poverty reduction. Gabon, known for its high carbon storage and low forest degradation within the Congo Basin, offers an exceptional environment for these efforts. CENAREST's work focuses on understanding the impacts of land use and climate change on biodiversity, ecosystem services, and the socio-economic aspects of conservation. CENAREST collaborates extensively on tropical ecology and global environmental change through active partnerships with regional and international organizations across the Congo Basin.

PANGEA's objectives align closely with CENAREST's mission, particularly in the integration of satellite data with ground and airborne measurements. These tools are critical for improving predictions of tropical forest responses to climate and land-use

changes, enabling the development of robust, science-based strategies for mitigation and adaptation. We are excited about PANGEA's emphasis on Earth observation technologies and its multidisciplinary approach to studying tropical forests, peatlands, and wetlands, which are essential for addressing complex ecological challenges.

CENAREST actively partners with key Gabonese institutions, such as the Agence Nationale des Parcs Nationaux (ANPN), the Agence d'Etude et d'Observation Spatiale (AGEOS), the National Climate Council (CNC), and the Gabonese Ministry of Water and Forests. These established partnerships, combined with our in-depth regional expertise, position CENAREST to provide robust local support for PANGEA's implementation in Gabon. If PANGEA is selected, CENAREST is prepared to offer in-kind support, including data sharing, assistance with local logistics, facilitation of research permits, and community engagement. Furthermore, we are committed to exploring funding opportunities to actively contribute to PANGEA's research and application activities.

We are confident that PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities will complement and enhance our own efforts, including improved carbon stock assessments, deeper understanding of land-use changes, and strengthened biodiversity conservation strategies.

As Commissaire General (Executive Director) of CENAREST and African Senior scientist on tropical and global ecology, I strongly believe that PANGEA represents an exceptional opportunity to tackle some of the most pressing global challenges. We are proud to offer our full support for this groundbreaking campaign and are optimistic that NASA's endorsement will help bring this valuable partnership to fruition, furthering our shared objectives of climate mitigation and biodiversity conservation.

Sincerely yours,



**Professor Alfred NGOMANDA**

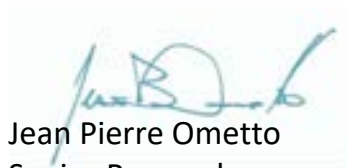
São José dos Campos, November 11, 2024

## **PANGEA letter of support**

To whom it may concern:

The Strategic Projects Division of the National Institute for Space Research is pleased to support the PANGEA proposal. I foresee that the innovative approach in PANGEA will help to advance the understanding of the critical role that tropical forests play in the global climate, ecosystem services and relevance to local communities. Several projects developed by the Brazilian scientific community (e.g., LBA, ATTO, AMAZONFACE, ADAPTABRASIL, to name a few) are closely related to the PANGEA scientific agenda.

The team of scientists linked to the Strategic Project and the Impact, Adaptation and Vulnerability Divisions (where I also work) are eager to fully support PANGEA and are ready to help with the implementation plan, integrating our activities with its critical scientific agenda.



Jean Pierre Ometto  
Senior Researcher  
Head of the Strategic Project Division

REPUBLIQUE DU CAMEROUN  
Paix-Travail-Patrie

OBSERVATOIRE NATIONAL SUR  
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

DIRECTION GENERALE

N° 000148 /L/ONACC/DG



REPUBLIC OF CAMEROON  
Peace-Work-Fatherland

NATIONAL OBSERVATORY  
ON CLIMATE CHANGE

DIRECTORATE GENERAL

Yaoundé, le 26 NOV 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly contribute to enhance relevant initiatives currently carried out by the National Observatory on Climate Change for Cameroon (ONACC).

ONACC is a State autonomous Scientific and Technical Institution created by a Presidential Decree and placed under the Technical supervisory authority of the Cameroon Ministry of Environment. ONACC has as main mission to monitor and assess the socioeconomic and environmental impacts of climate change and to propose prevention, mitigation and/or adaptation measures to fight the adverse effects and risks associated with these changes. To this end, it shall in particular:

- define relevant climate indicators for monitoring the environmental policy;
- conduct prospective studies to propose a vision on the evolution of climate in the short, medium and long terms;
- monitor the evolution of climate, provide weather and climate data/information to all sectors of human activity concerned and produce the annual climate report for Cameroon;
- initiate and promote studies on the identification of indicators, impacts and risks related to climate change;
- collect, analyze and make available to policy makers, private as well as various national and international organizations, reference information on climate change in Cameroon.
- initiate activities to promote awareness and information on the prevention of climate change;
- serve as operational tool to all other activities aimed at reducing greenhouse gases;
- carry out greenhouse inventories and produce annual Carbon balance of all socioeconomic development sectors;
- propose to the Government preventive measures for the reduction of greenhouse gas emissions, as well as mitigation and/or adaptation to the adverse effects and risks associated with climate change;
- serve as an instrument of cooperation with other regional or international observatories operating in the climate sector;

ONACC's primary focus is on several key action areas: the production of robust and precise climate services and forecasting, vulnerability studies, assessment of the economic cost of climate variability on the one hand and on the other, GHG emission inventory and production of annual carbon balance of the various socioeconomic development sectors including but not limited to agriculture, forestry and other land-uses. ONACC uses GIS and remote sensing tools to monitor forest cover change (losses and gains). She also uses climate modelling for forecasting weather and climate dynamics.

It is important to state here that PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at ONACC. We are eager to support PANGEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches in research in tropical forests, peatlands, wetlands and agricultural systems.

ONACC currently works on specific domains such as assessing the economic costs of climate change in the agricultural sector, disaster risk prediction and monitoring, and supporting farmers in climate adaptation efforts with partners including FAO, WFP, FIDA, GIZ, WWF, IUCN, ACF, USFS. Our shared expertise and ONACC's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGEA's implementation in Cameroon and the Central African Sub region.

If PANGEA is selected, ONACC can provide in-kind support through local logistics, regionally relevant translation of science to action, and coordination with government ministries. Our team is also prepared to explore funding opportunities to participate in PANGEA-related research and application activities.

We see an opportunity for PANGEA's focus on advancing remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, such as desired collaboration to enhance fire risk monitoring capabilities and develop fire monitoring tools to guide farmer land-use practices to support low-emissions agriculture, improve local and regional weather and climate predictions and improve local and regional early warning systems, and assess the economic cost of extreme weather events in the various socioeconomic development sectors.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director General at ONACC, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate mitigation and adaptation goals, with a particular emphasis on resilient and sustainable development based on scientific evidence and local knowledge.

Prof. AMOUGOU Joseph Armathé  
Director General  
National Observatory on Climate Change, Cameroon  
Email: [info@onacc.cm](mailto:info@onacc.cm), [josepharmathe@yahoo.fr](mailto:josepharmathe@yahoo.fr)  
Website: [www.onacc.cm](http://www.onacc.cm)  
App. onacc.alerte downloadable from Google playstore





**BERKELEY LAB**

CLIMATE AND ECOSYSTEM  
SCIENCES DIVISION

---

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter confirms our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGAEA). Should the proposed field campaign be selected, PANGAEA will provide critical data on the dynamics of tropical forests across the tropics, train a new generation of scientists domestically and internationally, and foster collaborative international research that will help advance pressing scientific needs on the future of tropical forests under global change. Importantly, PANGAEA will be synergistic to the Next Generation Ecosystem Experiments (NGEE-Tropics) activities led and carried out by Lawrence Berkeley National Lab and our partner institutions.

NGEE-Tropics is a long-term, multi-institutional project that has been supported by the Department of Energy since 2015 (<https://ngee-tropics.lbl.gov>). NGEE-Tropics aims at development and testing of a process-rich ecosystem model that can be used to project the future of tropical forests under global change. To this end, we currently are developing and testing the ELM-FATES model, which represents plant demography and a broad set of tropical forest processes, as well as field activities to measure plant physiology, forest demography, soil hydrology and biogeochemistry, and ecosystem carbon and water cycling, at multiple field sites, including in Panama, Brazil, and Malaysia.

There are multiple highly aligned goals between NGEE-Tropics and PANGAEA, as both projects

**Lawrence Berkeley National Laboratory**

---

One Cyclotron Road / Berkeley, California 94720 / phone 510-486-4000

aim to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. For example, both projects seek to understand the processes that govern forest carbon and water cycling, and growth and mortality dynamics of tropical forest trees. We also share the same vision on integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests. There are also key areas of complementarity between the projects, for example PANGEA's focus on African tropical forests, which NGEE-Tropics was not able to investigate as fully as forests in the Americas and Asia.

If PANGEA is selected, our team will also seek opportunities for direct collaboration with PANGEA, for example, through the development of proposals for funding opportunities aligned with PANGEA's goals.

PANGEA is a much-needed project that has the potential to greatly expand the scientific knowledge of critical yet under-studied ecosystems. Being the lead PI of NGEE-Tropics, I express my utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will unlock several opportunities for a strong partnership with NGEE-Tropics.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Charlie Koven', with a long horizontal flourish extending to the right.

Charlie Koven  
Senior Scientist  
Climate and Ecosystem Sciences Division  
Lawrence Berkeley National Lab



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing on behalf of the One Forest Vision Initiative (OFVi) to express our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical data, methods, applications, and training gaps related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGAEA will also support and reinforce international scientific cooperation and data collection activities led and carried out by OFVi.

OFVi is a scientific initiative that was initiated in 2023 in France by the coalition of 6 French research institutions: CEA, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD and MNHN, (for further details, please refer to our website: <https://www.oneforestvision.org/eng>). Our goal is to provide scientific support to countries within tropical basins with a specific focus on preserving their environmental integrity, particularly regarding the biodiversity and carbon stocks contained in tropical forests and wetlands. To achieve our objectives, we currently (i) increase and disseminate scientific knowledge on biodiversity and carbon; (ii) strengthen the skills and autonomy of researchers and managers in the Congo Basin; (iii) develop and disseminate biodiversity and carbon monitoring tools in the Congo Basin, more specifically in Congo, DRC and Gabon.

We see several aligned efforts and general aims between One Forest Vision and PANGAEA, in particular in the measurement and monitoring of forest composition, structure and biogeochemical cycling. We are keen to support PANGAEA in leveraging Earth observation techniques and multidisciplinary datasets to conduct impactful research. We are particularly

excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We pursue scientific activities and collaboration with local institutions from Congo, DRC, Gabon, Cameroon and Uganda. We are conducting field activities in 8 “super-sites” in these countries (link to the super-sites map : <https://www.oneforestvision.org/eng/scientific-productions/pillar-1>). These locations may be of strategic importance to PANGAEA because of their habitat type and long-term data. Members of One Forest Vision have been working in some of these locations for years and can facilitate PANGAEA’s implementation by helping with local expertise and the access to crucial data.

Should PANGAEA be funded, One Forest Vision can provide aligned activities in the form of workshop and event expenses. While our initiative aims to assess the state of animal biodiversity in relation to plant biodiversity and the structure and functioning of the forest habitat ; to develop new approaches to enable multi-year monitoring at high spatial resolution of the structure, above-ground biomass and functional composition of tropical forests ; to build capacity building for local researchers and managers in the Congo Basin, we seek to ensure our activities are synchronized and complementary to other similar efforts carried out in the region. We already participate to monthly meetings with the PANGAEA scoping team and the ongoing Congo Basin Science Initiative team.

We believe that PANGAEA is an important project with the potential for high impact. As co-coordinators at One Forest Vision initiative, we express our utmost support for the PANGAEA campaign and hope that NASA’s support of PANGAEA will enable us to pursue this common activity.

The 24th September 2024:



**Jean-François Soussana**

*Co-coordinator for One Forest Vision initiative*

Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE)  
147 rue de l'Université, 75338 Paris, France



**Laurent Durieux**

*Co-coordinator for One Forest Vision initiative*

Institut national de Recherche pour le Développement (IRD)  
44 boulevard de Dunkerque 13572 Marseille, France



**Alain Billand**

*Co-coordinator for One Forest Vision initiative*

Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (CIRAD)  
42, rue Scheffer, 75116 Paris France



**PennState**

**Department of Meteorology  
and Atmospheric Science**  
The Pennsylvania State University  
502 Walker Building  
University Park, PA 16802

814-865-0478  
meteodept@meteo.psu.edu  
met.psu.edu

Dr. Elsa Ordway  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
University of California, Los Angeles  
410K Botany Building, Los Angeles, CA, 90095

Re: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

We thank you for your leadership in developing the science plan of the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. We, the undersigned at The Pennsylvania State University, enthusiastically support the PANGEA program as it calls for novel and urgently needed research to advance the current understanding of the structure and function of the iconic tropical rainforests, which are undergoing major degradation in response to the influences of a rapidly changing global climate and land use changes.

Penn State University has several academic units and research groups, which have active interdisciplinary research programs related to the processes and activities that PANGEA will address over the next few years. In addition, we have strong graduate programs in Ecology, Ecosystem Science and Management, and Geography that grant Master of Science and Doctoral degrees. The academic program in Climate Science provides outstanding academic training in emerging research areas such as numerical modeling, data assimilation, machine learning, and artificial intelligence. At Penn State University, one key strength of academic training and research activities relates to climate change investigations and climate solutions, as evidenced by the Earth and Environmental Systems Institute, the Institute of Energy and Environment, and our new Penn State Climate Consortium ([climate.psu.edu](http://climate.psu.edu)). Our pioneering strategies of engaging traditionally underrepresented groups in science and engineering will advance the community engagement component of the PANGEA initiative.

We wish to contribute to PANGEA's goals to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. New findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems and the people that depend upon them. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research and academic priorities. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observations and generate multidisciplinary data sets and methods to conduct ecological research. We are particularly excited to engage with diverse partners, including Indigenous communities, throughout the Tropics such that we can develop and advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, at Penn State University, we can provide cost-shared funding in the form of in-kind support contributed through the availability of research infrastructure such as laboratories equipped with contemporary technologies, and climate and ecological numerical models, and academic tuition or stipend support, commensurate with our university commitment to supporting graduate and undergraduate education. In addition, the Penn State University team will develop research proposals to seek funding to support participation in PANGEA-related studies. Our research proposals would draw from our current research interests and expertise that are closely related to PANGEA science questions: **"How do ongoing and projected changing climate impacts influence the resilience of the tropical carbon sink?"** and **"How does the weakening of the carbon sink influence additional feedbacks on the Earth's climate?"**

Our interest in PANGEA stems from previous experiences and partnerships that we have pursued in the Amazon rainforest. We have established long-term collaborations with diverse colleagues from academic institutions and government agencies in South America. Such partners will participate in PANGEA-related activities and play key roles in developing new research aimed at addressing regional and national land management practices. The Amazon rainforest plays critical roles not only in terms of water and carbon cycling but also in influencing the Earth's climate. Therefore, the Amazon is a strategic region to be investigated as part of the PANGEA initiative. Given our previous research in the Amazon during the last two decades, we can help facilitate PANGEA's implementation by assisting with ground-validation studies, numerical modeling, and community engagement. We will contribute analysis tools that identify causal feedback processes related to water and carbon cycling that lead to improved understanding of the nonlinear processes within the climate dynamics. In that context, one specific goal is to develop process-based numerical models to estimate the magnitude of feedbacks that can then be employed to perform targeted ground-based observations and thus enhance the fidelity of the data collection process. Our expertise with Earth System Modeling will be critical for identifying pathways that will inform ways to collect observational data that can inform causal inference estimates of tropical forest structure and function, and provide validation of remote sensing information. Our research community has existing and growing research interests working directly with Indigenous communities in the tropics, including in tropical South America and Africa. This work engages directly on issues related to climate resilience, socio-ecological systems, and Indigenous knowledge systems, providing ample opportunities for bridging Earth system modeling through a co-design framework.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), data sets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. PANGEA will certainly provide the unique venue to achieve a common set of novel research hypotheses that would create needed knowledge of tropical forest systems in a rapidly changing environment. We, therefore, are enthusiastic to join in the pursuit of new research endeavors under the auspices of PANGEA.

Sincerely,



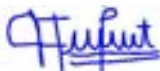
Erica Smithwick

Distinguished Professor of Geography, Walker Building, 302 North Burrowes Street, University Park, PA 16802; Director, Earth and Environmental Systems Institute; Associate Director, Institute of Energy and the Environment; The Pennsylvania State University, University Park, PA USA; Email: smithwick@psu.edu



Chris E Forest

Professor of Climate Dynamics, Department of Meteorology and Atmospheric Science, 507 Walker Building, University Park, PA 16802; Email: ceforest@psu.edu



Jose D Fuentes

Professor of Atmosphere Science, Department of Meteorology and Atmospheric Science, 508 Walker Building, University Park, PA 16802; Email: jdfuentes@psu.edu



Dr. Elsa Ordway  
Department of Ecology and Evolutionary Biology  
University of California, Los Angeles

10 December 2024

Dear Dr. Ordway,

Planet Labs expresses its strong support for the UCLA-led proposal entitled *The PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGEA) and the diverse coalition the initiative has brought together and continues to build. Planet believes that, if granted, the proposal has the potential to use space to help life on Earth by building understanding of the variation between and within Earth's two largest tropical forests in the Americas and Central Africa as they face rapid and large-scale climate and land-use changes that are already underway.

In addition, Planet believes that PANGEA, drawing on Planet's Earth observation data and analytics, can help make change visible, accessible, and actionable in accordance with Planet's mission. This mission aligns with PANGEA's well-established aim to establish patterns of recent and ongoing change in tropical forest landscape states, dynamics, and feedbacks; delineate the processes control heterogeneity in the vulnerability of tropical forest landscapes to structural and functional change; and the integration of space-based and in situ data to assess functional diversity, canopy foliar traits, carbon stocks, vertical structure of ecosystems, and other key characteristics in these regions.

Planet constantly evaluates new capabilities and providers developing new satellite products and services. For the reasons set forth above, in the event the proposal is selected for award, Planet is prepared to offer its support to PANGEA, subject to a more formal agreement.

Yours sincerely,

**Amy Rosenthal, Senior Global Director, Conservation Initiatives**  
Planet Labs PBC

**Boston University**

Department of Earth and Environment  
685 Commonwealth Ave, Rm 130  
Boston, MA 02215



November 20, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled *PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation* (PANGAEA). If funded, PANGAEA will significantly advance the measurement and modeling of tropical ecosystem processes, biogeochemistry, and greenhouse gas dynamics and their interactions with climate and human activities. The field campaign will make a major contribution towards understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGAEA's main goals are very aligned with the model-data fusion activities conducted by the PEcAn (Predictive Ecosystem Analyzer) project.

PEcAn is a community cyberinfrastructure project that has been supported by a wide range of funding agencies (NASA, NSF, DOE, DoD SERDP, ARPA-E) and tech partners (Google, Amazon, Red Hat) since 2009 (<https://pecanproject.org/>). PEcAn's vision is to see ecosystem science, policy, and management informed by the best available data and models. We aim to achieve this through our mission to develop and promote open, accessible tools for reproducible ecosystem modeling and forecasting. This includes interoperable support for running >20 land models and analyzing them through a wide range of tools for data ingest, uncertainty propagation and partitioning, model calibration, validation, visualization, and iterative data assimilation. In particular, PEcAn is currently focused on developing continental-scale carbon cycle reanalysis products that fuse numerous bottom-up and remotely-sensed data constraints

with process-based models to produce harmonized carbon budgets with sophisticated uncertainty accounting across space, time, and pools/fluxes. We are working with a number of international, federal, and state agencies to integrate these products into carbon inventories, with an aim to expand to a global scale over the next few years.

PEcAn and PANGEA are inherently synergistic. For example, both PANGEA and PEcAn are focused on uncertainty quantification, field campaigns inspired by modeling needs and uncertainties, and better connecting science to policy, management, and decision making (e.g., national C inventories, REDD, voluntary markets). Likewise, PEcAn is deeply interested in integrating observations across multiple scales with mechanistic models to gain process-understanding of the main drivers of changes in forests, which complements PANGEA's overall objectives.

Should PANGEA be selected, the PEcAn group will seek opportunities for close collaboration with PANGEA. For instance, we will look for funding opportunities that are related to PANGEA's goals, and will make PEcAn tools and training available to PANGEA scientists, including but not limited to working to add additional PANGEA-prioritized models to PEcAn and extending existing workflows to PANGEA sites and regional domains.

PANGEA is an exciting and much needed project, and will significantly advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regime. As the PEcAn project lead, I confirm our utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign, and look forward to exploring opportunities for collaboration between PEcAn and PANGEA.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Michael C. Dietze". The signature is fluid and cursive, with the first name "Michael" being more prominent than the last name "Dietze".

Michael C. Dietze  
Professor, Boston University  
PEcAn project lead  
Director, Ecological Forecasting Initiative

## **Letter of support to the PANGEA research project lead by Elsa Ordway**

I am writing to offer my strong support for the research project PANGEA that aims to explore how climate change and land-use changes are influencing the vulnerability and resilience of tropical rainforests, particularly those in Central Africa and the Amazon, and explores the degree to which these rainforests are impacted in similar or divergent ways. By examining both regions in tandem, this study has the potential to provide invaluable insights into how different rainforest ecosystems respond to similar climate and land use stressors and to identify the unique challenges each region faces.

The comparative nature of the research will offer new perspectives on the resilience of these ecosystems and inform conservation strategies that are tailored to the specific needs of each region. Furthermore, the findings could provide important guidance for policymakers and conservation organizations working to mitigate the impacts of climate change on biodiversity and forest health.

The research methodology outlined in the white paper demonstrates a robust approach to understanding the complex interactions between climate change and rainforest ecosystems. The project's interdisciplinary approach promises to yield results that are scientifically sound and of practical importance to global environmental sustainability efforts.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Tørris Jæger'.

Tørris Jæger  
Secretary General



November 4, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, California 90095  
USA

Dear Dr. Elsa Ordway:

**Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

This letter is to provide my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If this field campaign is selected, it will provide critical measurements needed for advancing understanding of Earth's largest store of living carbon and will inform the scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests required for constraining Earth system models and projecting impacts and feedbacks of climate change. The goals and deliverables of PANGEA are well aligned with the simulation and analysis of global biogeochemical cycles conducted in the Reconciling Uncertainties in Biogeochemical Interactions through Synthesis and Computation (RUBISCO) Science Focus Area.

RUBISCO is a project supported by the US Department of Energy that investigates terrestrial and marine biogeochemical cycles by combining observations and models to understand feedbacks of climate change. One of the key products emerging from the project is the open source International Land Model Benchmarking (ILAMB) package, which assesses the fidelity of land carbon cycle models through comparison with best-available observations. PANGEA shares strong synergy with the RUBISCO project for the incorporation of new multi-scale reference (observational) data sets into ILAMB and the creation of new tropical ecosystem-relevant metrics for evaluating mechanistic models of tropical forests.

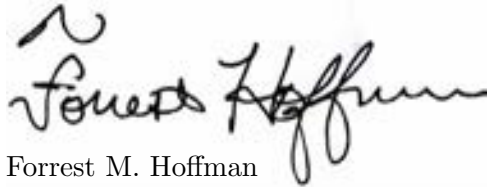
Should PANGEA be funded, the RUBISCO project team will collaborate directly with PANGEA on constraining models of tropical ecosystems and will seek collaborative funding opportunities to propose additional projects that are synergistic with PANGEA's main goals.

PANGEA has a unique potential to significantly advance understanding and reducing uncertainties on the impacts of global change on tropical forests. Therefore, as the Laboratory Research Manager, I express my utmost support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable multiple collaboration opportunities with the RUBISCO project.

Dr. Elsa Ordway  
Page 2  
November 4, 2024

If I can provide any additional information in support of PANGEA and potential collaborations with the RUBISCO SFA, please contact me at your earliest convenience.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, reading "Forrest Hoffman". The signature is written in a cursive style with a large, stylized "F" and "H".

Forrest M. Hoffman  
Distinguished Computational Earth System Scientist  
Group Leader, ORNL Integrated Computational Earth Sciences (ICES) Group  
Laboratory Research Manager, Reconciling Uncertainties in Biogeochemical Interactions  
through Synthesis and Computation (RUBISCO) Science Focus Area

Le directeur du département ECOBIO

Montpellier, le 5 décembre 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing on behalf of IRD, the French Institute for Sustainable Development, to express our support to project PANGEA (PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation) submitted to NASA Terrestrial Ecology Field Campaign. If selected, this project will complement the efforts of IRD teams and researchers to collect critical data, develop methods and applications, and build capacities for the monitoring, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and their interactions with biodiversity, climate change, human activities.

PANGEA will more specifically complement IRD research efforts in the Congo Basin forests, where we support for years international scientific cooperation. We see several aligned efforts and general aims between IRD research programs and PANGEA, in particular with activities conducted by our Laboratoire Mixte International DycoFac (Dynamics of Continental Ecosystems in Central Africa (<https://www.lmi-dycofac.org/>), which contributes, with local partners, to the monitoring of forest composition, structure and biogeochemical cycling. We are keen to support PANGEA in leveraging Earth observation techniques and multidisciplinary datasets to conduct impactful research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the topics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We believe that PANGEA is an important project with the potential for high impact and we express our utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common activity.

**Jean-Christophe AVARRE**



**Directeur du département ECOBIO**



Kinshasa November, 22, 2024

N/Réf : OSFAC-HQ/22112024

**Dr. Elsa Ordway**

Department of Ecology and Evolutionary Biology  
University of California, Los Angeles  
410K Botany Building, Los Angeles, CA, 90095

**Concern:** Letter of Support for PAN tropical investigation of  
bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

**Dear Dr Elsa Ordway,**

We are delighted to know that you are submitting a proposal for the implementation of a major international project called "***The PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)***" which will address several themes. This excellent initiative will provide a lot of scientific knowledge on tropical ecosystems.

The objectives of PANGEA are in line with the vision of the Satellite Observatory of Forests of Central Africa (**OSFAC**) which is a Non-Governmental Organization (NGO) with a regional vocation and also representative in Central Africa of the international network Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics (GOFC-GOLD). Indeed, OSFAC's vision is that Central Africa has reliable and relevant data to guide decision-making. With this in mind, OSFAC and its partners in Africa and Northern countries work to provide users and decision-makers with reliable and regularly updated information. This information relates to the state of forests, their dynamics (extent of forest cover, deforestation,



# OSFAC

*Observatoire Satellital des Forêts d'Afrique Centrale*

degradation, forest fires, restoration of forest landscapes, etc.), the drivers that guide this dynamic, the quantification of biomass, carbon and greenhouse gas emissions, climate change etc.

We are confident that the implementation of the PANGEA Project will be a good opportunity to better understand the composition and functioning of tropical ecosystems, as well as the immense role they play in the living conditions of populations but also on several questions of interest the world today, among other things, climate change. In addition, considering all the teams that could participate in this project, PANGEA will be a place for multicultural meetings, a laboratory of ideas and proposals for innovative solutions.

The methods, tools (satellites, drones, planes) and data (in-situ, optics, Radar, Lidar, etc.) that the PANGEA Project plans to use will make it possible to generate results that will be used to resolve a large part of the environmental problems of the tropical world and contribute to improving the well-being of populations in this region.

It is for this reason that the Satellite Observatory of Central African Forests (OSFAC) of which I am the Director fully supports the PANGEA Project and wishes its funding.

Sincerely,

**DIRECTOR OF OSFAC**



*[Handwritten signature]*  
**Dr. Landing MANE**

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

6, September, 2024

**RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. The Society for the Protection of Underground Networks (SPUN) is happy to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

SPUN is a scientific research NGO that was established in 2021 ([www.spun.earth](http://www.spun.earth)) with a mission is to map, protect, and harness the mycorrhizal fungal networks that regulate Earth's climate and ecosystems. Mycorrhizal fungi form root symbioses with more than 90% of all plant species, creating underground networks that draw down carbon and provide essential nutrients to plants. These fungi help soil ecosystems store 75% of all terrestrial carbon, but mycorrhizal fungi are overlooked in Natural Climate Solution (NCS) goals. SPUN is developing high-resolution global and regional datasets of mycorrhizal fungal diversity and functioning to advocate for their protection and inclusion in NCS strategies.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities of pinpointing degraded ecosystems with underperforming fungal networks and identifying keystone mycorrhizal species associated with the recovery of threatened ecosystems. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, SPUN can provide cost-shared funding in the form of in-kind support contributed through the availability of SPUN's research infrastructure (e.g., computation resources for fungal bioinformatics, ecological modeling, and geospatial analysis), staff time, and relevant travel costs related to two of SPUN's ongoing project areas:

1) integrating remote sensing tools with *in-situ* mycorrhizal fungal measurements and 2) SPUN's Underground Explorers Grant program. These projects are closely related to PANGEA Science Question 1 (*Examine similarities and differences in forest composition, structure and biogeochemical cycling across tropical regions*), and PANGEA broader impact goals of advancing scientific capacity for researchers in the Global South.

Monitoring changes in mycorrhizal biodiversity is time and resource intensive with on-the-ground measurements. We need a dynamic way to estimate underground network responses in real-time, at scale. Remote sensing technologies offer the ability to observe plant biodiversity and ecosystem functioning with high spatial and temporal resolution, but so far its applications are limited to aboveground ecosystems. SPUN has partnered with Caltech and the 11th Hour Project at the University Chicago Data Science Institute to explore whether remote sensing data can be used to detect changes in mycorrhizal fungal diversity and abundance. Our goal is to identify mycorrhizal signatures in the immense volume of remotely-sensed spectral data from US [National Ecological Observatory Network](#) sites. However, these data do not cover tropical forests or tropical mycorrhizal fungi, meaning that any spectral biology models we develop to estimate mycorrhizal fungi will be incomplete and likely unapplicable for tropical systems. Working with PANGEA, SPUN will leverage our capacity to generate extensive *in-situ* mycorrhizal fungal data paired with the specific flight campaigns of this tropical focused NASA Terrestrial Ecology program. These novel datasets will 1) provide critical insights for understanding the role of mycorrhizal fungi in shaping biogeochemical variation across different tropical forest regions, and 2) expand the range of habitat types represented in our paired spectral-fungal dataset to remotely sensing mycorrhizal symbioses in all forest types.

SPUN has developed efficient data protocols and analysis pipelines for generating precise mycorrhizal fungal data in difficult-to-access regions of the world, including tropical forests in Colombia and Ghana. Our organization excels at community building, with a global network of 415+ Science Associates from more than 79 countries. Additionally, we have awarded a total of 92 Underground Explorer grants to an exceptional cohort of soil fungal researchers from 43 countries. Notably, 83% of these grants have been allocated to scientists based in the Global South. Our Underground Explorers are now conducting soil sampling across every continent, focusing on some of the world's most under-explored ecosystems. To maximize the impact of their research, we provide each Explorer with comprehensive technical and communications support. For specific locations in South America, Africa, Southeast Asia, SPUN can leverage our network of local researchers to engage and coordinate research activities with PANGEA to explore using satellite imagery to improve fungal biodiversity monitoring and belowground carbon accounting in tropical forest ecosystems.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.



Dr. E. Toby Kiers

Professor, Faculty of Science, Ecology & Evolution, Vrije Universiteit Amsterdam

Executive Director & Chief Scientist, Society for the Protection of Underground Networks



Dr. Michael Van Nuland

Lead Data Scientist, Society for the Protection of Underground Networks

Dr Elsa Ordway  
Ecology & Evolutionary Biology  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA  
90095, USA

26 August 2024

Dear Dr Ordway

**Re: Support for NASA Research Opportunities in Space and Earth Sciences (ROSES) programme PANGEA – PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation**

I am writing to offer the UK Centre for Ecology & Hydrology's (UKCEH) support for the proposed PANGEA project. We understand that PANGEA will link remote sensing data with on-the-ground measurements in tropical forests across the globe, to answer questions on tropical forest biodiversity, functioning, carbon stocks and sequestration, and how these will be affected by climate and land use change in the future. Answering these questions will lead to fundamental understanding that is crucial to mitigating climate change and enabling successful conservation and restoration of tropical forests.

UKCEH is an independent, not-for-profit research institute and the UK's leading institute for the terrestrial and freshwater sciences. We have a global impact, producing cutting edge scientific discoveries and contributing to understanding and monitoring the environment of our planet. We deliver these through valuable partnerships, using state of the art research facilities, managing interdisciplinary projects and comprehensive monitoring programs supported by 500 expert scientists.

Here at UKCEH we have a long history of collaborations in tropical forest ecology across Latin America, West and East Sub-Saharan Africa and Southeast Asia. My colleagues Dr Jill Thompson, Dr Lindsay Banin and others, are deeply embedded in long-term tropical research sites that could be focal landscapes for PANGEA, or provide complementary, contextual information. Our research questions in the tropics focus around climate change and greenhouse gases, forest functioning, plant community change, plant-animal interactions, land-use change and biogeochemical fluxes, social-ecological interactions, forest recovery and restoration. We also



UK Centre for  
Ecology & Hydrology

UK Centre for Ecology & Hydrology  
Macleon Building, Benson Lane  
Crowmarsh Gifford, Wallingford  
Oxfordshire  
OX10 8BB  
UK

T: +44 (0)1491 838800

process remotely sensed data from a variety of sources and have foundational skills in data management, analysis and synthesis.

The PANGAEA proposal could provide a unique opportunity to link remotely-sensed data at various scales with ground-based data that UKCEH could effectively contribute to. UKCEH could provide information and connections with international organizations to assist in site selection for PANGAEA activities. We would be keen to seek independent and joint funding with PANGAEA members to enable collaborative research between UKCEH and PANGAEA to promote our scientific endeavours.

Yours sincerely

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Harry Dixon'.

**Prof Harry Dixon**

**Associate Director of International Research and Development**

Email: [harr@ceh.ac.uk](mailto:harr@ceh.ac.uk)



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095

**Subject: Letter of Support for  
PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical knowledge gaps on the impact of climate change on tropical forests such as the Congo Basin. PANGEA's work will make an important contribution to the activities led and carried out by the Science Panel for the Congo Basin, convened by the United Nations Sustainable Development Solutions Network.

The [Science Panel for the Congo Basin](#) (SPCB) was established in 2023 at COP28, in Dubai, as an independent platform for scientists from the region to synthesize the existing knowledge including Indigenous peoples and autochthonous knowledge on the functioning of, and threats to, the Congo Basin and its ecosystems. The Panel was inspired by the successful Science Panel for the Amazon (SPA). It collaborates with SPA along with the newly formed Science Panel for Borneo (SPB) to facilitate scientific communication across the three tropical forest ecosystems. SPCB is currently engaged in developing its first assessment report to present at COP30, in Belém.

We see several aligned efforts and general aims between the Science Panel for the Congo Basin and PANGEA, in assessing the impact of anthropogenic activities on tropical forest ecosystem health and resilience. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

While our Panel excels at analyzing the current body of knowledge on the Congo Basin, we require a strong basis of existing information. PANGEA's efforts to expand knowledge on the impact of climate change in tropical forests will contribute to achieve our aim.



We believe that this is an important project with the potential for high impact. As Strategic Coordinator for the SPCB, I express my strong support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue the common goal to bring the status of the Congo Basin to the global forefront.

Emma Torres  
Head of the New York Office and Vice President of the Americas  
Strategic Coordinator of the Science Panel for the Congo Basin  
United Nations Sustainable Development Solutions Network



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO**  
**VICERRECTORADO INVESTIGACION**

Ciudad Universitaria s/n Edificio Administrativo 2do Piso - Teléfono 51-365054



Dra. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

**Asunto: Carta de apoyo a la investigación PANTropical sobre biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGAEA)**

Estimada Dra. Ordway,

Por intermedio de la Universidad de Oklahoma, agradezco por la invitación a colaborar en la investigación PANTropical de biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGAEA). La Oficina del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno está encantada de apoyar el programa PANGAEA cuando se confirme la financiación de la NASA.

La Universidad Nacional del Altiplano, Puno, una universidad pública fundada el 29 de Agosto de 1856 en la Ciudad de Puno, Perú con la misión de desarrollar y transmitir el conocimiento científico, tecnológico y humanístico, formando profesionales y posgraduados calificados y competitivos, impulsando el desarrollo de la investigación y la responsabilidad social, la práctica de valores y la identidad cultural, orientadas al estudiante y la sociedad, con miras a contribuir al desarrollo sostenible de la región y del país.

El objetivo de PANGAEA es mejorar la comprensión de cómo el clima global y los cambios antropogénicos afectan la composición, la estructura y el ciclo biogeoquímico de los bosques en las regiones tropicales. Los nuevos hallazgos son necesarios para determinar la resiliencia y la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales tropicales. Por lo tanto, la agenda de investigación de PANGAEA está estrechamente alineada con nuestras prioridades de investigación. Esperamos apoyar los esfuerzos de PANGAEA para aprovechar la observación de la Tierra y los datos y métodos multidisciplinarios para realizar investigaciones. Estamos particularmente entusiasmados con las perspectivas de interactuar con diversas comunidades en todo el trópico para avanzar en la comprensión científica, fortalecer la capacidad de investigación ecológica y apoyar la aplicación de los resultados científicos a la gobernanza y las prácticas de gestión sostenible de la tierra.

En caso de que se financie PANGAEA, la UNAP proveerá espacios de colaboración para llevar a cabo estudios y experimentos especialmente en sus centros de investigación en la zona Amazónica y Andina así como la participación de profesores investigadores en el tema. La UNAP con su aliada estratégica la Universidad de Oklahoma (USA), buscarán desarrollar propuestas de investigación para buscar financiación para apoyar la participación en estudios relacionados con PANGAEA.



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO**  
**VICERRECTORADO INVESTIGACION**

Ciudad Universitaria s/n Edificio Administrativo 2do Piso - Teléfono 51-365054



Llevamos adelante esta iniciativa con nuestros investigadores, las comunidades locales, especialmente en la zona Amazónica de Puno, Carabaya, San Gabán, Sandía que se alinean a los objetivos de PANGAEA. LA UNAP en alianza con la Universidad de Oklahoma también facilitará alianzas con instituciones relevantes del gobierno para obtener datos históricos y apoyo para las investigaciones que PANGAEA lleve a cabo.

La UNAP apoya esta iniciativa enfocada en el ecosistema Amazónico de la región Puno, donde los efectos del cambio climático afectan a la población y el medio ambiente. El ecosistema Andino-Amazónico en el suroeste del Amazonas es de importancia estratégica para PANGAEA por ser la región que en la última década ha sufrido los mayores efectos de deforestación y contaminación ambiental del continente. La implementación de PANGAEA nos ayudará a renovar y potenciar nuestras estaciones experimentales, su instrumentación y formar profesores expertos en la biogeoquímica y adaptación ecológica en Puno, Perú.

Si bien nuestra universidad se destaca en poseer participación comunitaria, recopilación y análisis de datos terrestres buscamos participar en PANGAEA para desarrollar capacidad en investigación y educación para la siguiente generación de científicos formados en Puno. Igualmente nos ayudará a acceder a las tecnologías de NASA y aprovechar las imágenes satelitales por ejemplo para entender y mejorar el manejo del carbono.

Reconocemos los beneficios mutuos de compartir esfuerzos, métodos de investigación (por ejemplo, modelos numéricos), conjuntos de datos, recursos y experiencias para avanzar en la comprensión de la ecología terrestre y aprovechar mejor la observación de la Tierra para apoyar el objetivo de nuestra organización. Esperamos que el apoyo de la NASA a PANGAEA nos permita perseguir este interés común de investigación.

Atentamente,

  
  
Dr. Ariel Rogelio Velazco Cárdenas  
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN  
UNA - PUNO

## **Universidad Nacional del Altiplano UNAP Letter of Support – English Translation**

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

### **Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Through our partner the University of Oklahoma I thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. On behalf of the office of the Vice President for Research of the [Universidad Nacional del Altiplano](#), Puno (UNAP) I am glad to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

The UNAP It is a public university founded on August 29, 1856 in the city of Puno, Peru with the mission of developing and transmitting scientific, technological and humanistic knowledge, training qualified and competitive professionals and graduates, promoting the development of research and social responsibility, the practice of values and cultural identity, oriented to the student and society, with a view to contributing to the sustainable development of the region and the country.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities in the Amazon region of Peru. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, UNAP can provide the use of our university experimental stations and support for field work in the rainforest and Andean region. Similarly, we will involve our research faculty experts on the area. UNAP and its strategic partner the University of Oklahoma (USA), will work to develop research proposals seeking funding to support studies aligned with PANGEA

We pursue this initiative with local communities and institutions in the Amazonic and Andean regions that aligned with the objectives of PANGEA. UNAP and OU will also facilitate alliances with relevant government agencies to obtain historic and current data for the planed research.

UNAP supports this initiative focused on the Southern Amazon region of Peru where the effects of climate change effects severely the population and the environment. The Andean-Amazonian ecosystem in the southwest Amazon is of strategic importance for PANGEA because it is the region that in recent decades has suffered the most with massive deforestation, environmental pollution, and wildfires on the continent. The implementation of PANGEA will help us to renew and enhance our experimental stations, their instrumentation and train expert professors in biogeochemistry and ecological adaptation in Amazonas, Peru.

While our organization/institution excels in community engagement, local ground data collection, we seek to engage with PANGEA to help capacity building in research and education to train the next generation of scientists for the Amazon region in Puno. Similarly, we hope it will allow us access to new technology and information from NASA and benefit from the remote sensing information and maps to better understand for instance the carbon accounting in our region.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Sincerely,

Dr. Ariel Velasco Cardenas  
Vice Rector de Investigación  
Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Peru



Rectorado

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la Conmemoración de las Heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

Chachapoyas, 3 de octubre del 2024

**CARTA N° 065-2024-UNTRM-R**

**Dra. Elsa Ordway**

Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles

410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095

**Asunto: Carta de apoyo a la investigación PANtropical sobre biogeoquímica y adaptación ecológica (PANGEA)**

Estimada Dra. Ordway,

Por intermedio de la Universidad de Oklahoma, agradezco por la invitación a colaborar en la investigación PANtropical de Biogeoquímica y Adaptación Ecológica (PANGEA). En nombre de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas (UNTRM) deseo expresar nuestro apoyo al programa PANGEA, una vez se confirme el financiamiento de la NASA.

La UNTRM es una universidad pública creada el 18 de setiembre del 2000 en la Ciudad de Chachapoyas, Perú, con la visión ser líder y referente nacional e internacional en formación académica, investigación científica, tecnológica y humanista de calidad que contribuya al desarrollo de la sociedad.

El objetivo de PANGEA es mejorar la comprensión de cómo el clima global y los cambios antropogénicos afectan la composición, la estructura y el ciclo biogeoquímico de los bosques en las regiones tropicales. Los nuevos hallazgos son necesarios para determinar la resiliencia y la vulnerabilidad de los ecosistemas forestales tropicales. Por lo tanto, la agenda de investigación de PANGEA está estrechamente alineada con nuestras prioridades de investigación. Esperamos apoyar los esfuerzos de PANGEA para aprovechar la observación de la Tierra y los datos y métodos multidisciplinarios para realizar investigaciones. Estamos particularmente entusiasmados con las perspectivas de interactuar con diversas comunidades en todo el trópico para avanzar en la comprensión científica, fortalecer la capacidad de investigación ecológica y apoyar la aplicación de los resultados científicos a la gobernanza y las prácticas de gestión sostenible de la tierra.

En caso de que se financie PANGEA, la UNTRM proveerá espacios de colaboración para llevar a cabo estudios y experimentos, especialmente en sus centros de investigación en la zona Amazónica y Andina, así como la participación de profesores investigadores en el tema. La UNTRM con su aliada estratégica la Universidad de Oklahoma (USA), buscarán desarrollar propuestas de investigación para buscar financiamiento y apoyar la participación en estudios relacionados con PANGEA.

Llevamos adelante esta iniciativa con nuestros investigadores, las comunidades locales, especialmente en la zona Amazónica de la región Amazonas que se alinean a los objetivos de PANGEA, también, la UNTRM en alianza con la Universidad de Oklahoma promoverán la creación de



## Rectorado

"Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la Conmemoración de las Heroicas batallas de Junín y Ayacucho"

alianzas con instituciones relevantes del gobierno para obtener datos históricos y apoyo para las investigaciones que PANGEA lleve a cabo.

La UNTRM apoya esta iniciativa enfocada en el ecosistema Amazónico de la región Amazonas, donde los efectos del cambio climático afectan severamente a la población y el medio ambiente. El ecosistema Andino-Amazónico en el oeste del Amazonas es de importancia estratégica para PANGEA por ser la región que en las últimas décadas ha sufrido los mayores efectos de deforestación y contaminación ambiental del continente. La implementación de PANGEA nos ayudará a renovar y potenciar nuestras estaciones experimentales, su instrumentación y formar profesores expertos en la biogeoquímica y adaptación ecológica en Amazonas, Perú.

Si bien nuestra universidad se destaca en poseer participación comunitaria, recopilación y análisis de datos terrestres buscamos participar en PANGEA para desarrollar capacidad en investigación y educación para formar la siguiente generación de científicos formados en la región Amazonas. Igualmente nos ayudará a acceder a las tecnologías e información de la NASA y aprovechar las imágenes satelitales, por ejemplo, para entender y mejorar el manejo del carbono.

Reconocemos los beneficios mutuos de compartir esfuerzos y métodos de investigación, tales como, modelos numéricos, conjuntos de datos, recursos y experiencias para avanzar en la comprensión de la ecología terrestre y aprovechar mejor la observación de la Tierra para apoyar el objetivo de nuestra universidad. Esperamos que el apoyo de la NASA a PANGEA nos permita perseguir este interés común de investigación.

Atentamente,

UNIVERSIDAD NACIONAL  
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS  
  
Jorge Luis Maicelo Quintana Ph.D.  
Rector

JLMQ/Rector  
C.c. Archivo

## **Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza (UNTRM) – English Translation**

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

### **Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

Through our partner the University of Oklahoma I thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA) Scoping Campaign. On behalf of the [Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza](#) (UNTRM) I am glad to support the PANGEA program once NASA funding is confirmed.

The UNTRM It is a public university created on September 18, 2000 in the city of Chachapoyas, Peru with the vision of being a leader and national and international reference in academic training, scientific, technological and humanistic research of quality that contributes to the development of society.

PANGEA's aims to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions. The new findings are necessary to determine the resilience and vulnerability of tropical forest ecosystems. Therefore, the PANGEA research agenda is closely aligned with our research priorities in the Amazon region of Peru. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices.

Should PANGEA be funded, UNTRM can provide access to our university experimental stations and support for field work in the rainforest and surrounding Andean areas. Similarly we will involve our research faculty experts on the area. The UNTRM and its strategic partner the University of Oklahoma (USA), will work to develop research proposals seeking funding to support studies aligned with PANGEA

We pursue this initiative with local communities and institutions in the Amazonian and Andean regions that aligned with the objectives of PANGEA. The UNTRM and OU will also facilitate

alliances with relevant government agencies to obtain historic and current data for the planned research.

UNTRM supports this initiative focused on the Northern Amazon region of Peru where the effects of climate change severely affect the population and the environment. The Andean-Amazonian ecosystem in the western Amazon is of strategic importance for PANGEA because it is the region that in recent decades has suffered the most the effects of deforestation, environmental pollution, and wildfires on the continent. The implementation of PANGEA will help us to renew and enhance our experimental stations, their instrumentation and train expert professors in biogeochemistry and ecological adaptation in Amazonas, Peru.

While our organization/institution excels in community engagement, local ground data collection, we seek to engage with PANGEA to help capacity building in research and education to train the next generation of scientists for the Amazon region. Similarly, we hope it will allow us access to new technology and information from NASA and benefit from the remote sensing information and maps to better understand for instance the carbon accounting in our region.

We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our organization's goal. We hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common research interest.

Sincerely,

Dr. Jorge Luis Maicelo Quintana  
President  
Universidad Nacional Toribio Rodriguez de Mendoza,  
Amazonas, Peru



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA

## FACULTAD DE AGRONOMÍA

### DECANATO

June 10, 2024

Elsa M. Ordway, Ph.D.

Department of Ecology and Evolutionary Biology Institute of the Environment and Sustainability  
University of California, Los Angeles, USA

Dr. Ordway,

I am writing to express my sincerest gratitude for the invitation to participate in the PANGAEA Workshop, held at the Pontifical Catholic University of Peru in Lima. It was an enriching and valuable experience, both professionally and personally. The opportunity to share knowledge and experiences with colleagues from various institutions and countries was invaluable.

Additionally, I would like to express the intention of the Faculty of Agronomy at the National University of Piura to collaborate with you. We are deeply interested in working together on the study, analysis, and development of alternatives to address the negative effects of climate change on agriculture and the forest environment of the Amazon. We believe that close collaboration between our institutions can generate innovative and effective solutions to mitigate the impact of climate change in these crucial areas, strengthening our academic development and professional exchange in various scientific specialties.

In the Piura Region, we currently have a diagnosis of the effects of climate change on agriculture. This study has allowed us to propose concrete recommendations to prevent the increased risk in food production and suggest alternatives for biodiversity conservation. We would like to share these findings with you and your team and explore possible areas of collaboration to strengthen our joint efforts.

We look forward to the possibility of working with you and the University of California, Los Angeles, on initiatives that promote the sustainability and resilience of our agricultural and forest systems in the face of climate change.

Once again, thank you for the invitation, and I hope to establish a fruitful collaboration.

Sincerely,

Ing. Jose Remigio

Dean of the Faculty of Agronomy, National University of Piura  
51 990076076; [jremigioa@unp.edu.pe](mailto:jremigioa@unp.edu.pe), [remigiopepe@gmail.com](mailto:remigiopepe@gmail.com)



UNIVERSIDAD NACIONAL DE PIURA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA  
ING. JOSE REMIGIO ARGUELLO M.Sc.  
DECANO

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Louvain-la-Neuve, Belgium, July 25, 2024

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

Thank you for the invitation to collaborate on the PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA) Scoping Campaign. The [Land Systems for Sustainability](#) lab that I am leading at the Université catholique de Louvain (UCLouvain) in Belgium is happy to support the PANGAEA program once NASA funding is confirmed.

Our lab is part of [Earth and Life Institute](#) (ELI). Established in 2009, ELI is UCLouvain's flagship research institute on sustainability and environmental sciences, with over 300 researchers and key research foci on land-use change, climate change, soil sciences, and biodiversity conservation. ELI has a longstanding research track record in Earth Observation, land-use and land-cover change (LULCC) and global change studies in tropical regions. Within ELI, the research in our lab focuses on how land use and more broadly land systems can contribute to sustainability.

PANGAEA's aims—to improve the understanding of how global climate and anthropogenic changes impact forest composition, structure, and biogeochemical cycling across tropical regions—are clearly linked to our research agenda. We have been working on mapping and understanding tropical social-ecological systems, with a focus on the role of governance interventions (public, private and hybrid) and economic dynamics, in particular linked to international supply chains. We have been investigating various processes that are strongly linked to the PANGAEA agenda, including tropical deforestation, reforestation, and agricultural expansion, intensification and extensification. Our team has strong expertise in understanding drivers of land use and land system changes, including governance and economic structures such as international supply chains. The work developed in PANGAEA throughout its well-identified but strongly articulated Working Groups would be extremely useful for us for embedding our understanding of land system drivers into a broader understanding of their Earth System impacts, including biogeochemical cycles & carbon dynamics, ecosystem structure, function, biodiversity, and climate feedbacks and interactions. Further, we believe that we can develop valuable synergies with the social-ecological systems Working Group,

which investigates questions that are very close to our research agenda, such as *how does governance structure, policy, and market dynamics interact with climate change, and land use and land cover change in tropical regions, and which interventions are most effective in restoring and adapting social and ecological processes to changes in tropical regions.*

We look forward to supporting PANGAEA's efforts to leverage Earth Observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the Tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for ecological research, and support the application of scientific results to governance and sustainable land management practices. Although our team has been working in various contexts across the Tropics, we have developed a strong focus on the Miombo woodlands of Southern Africa, in particular Mozambique, where we collaborate with colleagues who have a very strong and long-standing expertise in ecosystem dynamics in these forests, in particular at Universidade Eduardo Mondlane (UEM). The Miombo woodlands are a highly understudied both in terms of social and ecological dynamics, and their interactions, and African research institutes are strongly under-represented in global change research. The teams led by our colleagues at UEM are pivotal in the research and the science-policy interface in Mozambique, being directly engaged with public authorities and administrations on policy-making and evaluation. I sincerely believe that engaging further in this region and with these partners would be highly beneficial for the research agenda and the positioning of PANGAEA.

Should PANGAEA be funded, we are willing to facilitate any engagement of PANGAEA in that region, and to consider developing research proposals, including in other regions, to seek funding to support participation in PANGAEA-related studies. We recognize the mutual benefits in sharing efforts, research methods (e.g., numerical models), datasets, resources, and experiences to advance understanding of terrestrial ecology and better leverage Earth observation to support our lab's goals. We hope that NASA's support of PANGAEA will enable us to pursue this common research interest.

Yours sincerely,

Professor Dr. Patrick Meyfroidt



-----

F.R.S. - FNRS &  
Earth and Life Institute - UCLouvain  
Place Louis Pasteur, 3  
1348 Louvain-La-Neuve Belgium  
Email : [patrick.meyfroidt@uclouvain.be](mailto:patrick.meyfroidt@uclouvain.be)  
Tel: +32 10 472 992 <http://www.uclouvain.be/eli>  
<http://landsystems-lab.earth/>

November 19, 2024

Elsa Ordway, Ph.D.  
Assistant Professor, UCLA Department of Ecology and Evolutionary Biology  
Co-Director, Congo Basin Institute, UCLA  
Co-Director, UCLA Center for Tropical Research

RE: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)

Dear Professor Ordway,

As the UCLA Vice Chancellor for Research & Creative Activities, I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA). This campaign, if selected, will fill critical data, methods, applications, and training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of remote sensing data in tropical forest regions.

If awarded, PANGAEA will be able to draw upon the extensive research infrastructure at UCLA. As one of the country's largest and most productive research universities with over \$1.5 billion in annual research funding, UCLA has experience managing large complex federal awards. UCLA's Office of Research Administration and other campus offices have the capacity, resources, and expertise needed to ensure appropriate award management.

In addition, UCLA has a history of nurturing international research programs, some of which will facilitate PANGAEA's data collection and engagement. UCLA co-founded the Congo Basin Institute (CBI) in 2015 as a model for modern scholarship in Africa. Based in Cameroon and covering the Central African region, CBI has nearly a decade of operational experience, dozens of collaborations with local researchers, and relationships with numerous local communities. Another example, the Center for Tropical Research (CTR), has been housed at UCLA since 2001 and promotes pan-tropical research in the three major tropical basins.

PANGAEA will also benefit from the enormous depth and breadth of scholarship at UCLA, which has over 140 departments and interdepartmental programs. Our highly engaged undergraduate and graduate student body will support PANGAEA's capacity-building goals. Furthermore, UCLA's status as an emerging Hispanic-Serving Institution and our partnership with Morgan State University, a historically Black university, will facilitate engaging minority and first-generation students in PANGAEA's research.

The PANGAEA campaign has significant potential for high-impact research. UCLA is committed to supporting the project's success and helping it flourish as part of UCLA's expansive research enterprise.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink that reads "Roger M. Wakimoto". The script is fluid and cursive, with the first letters of each word being capitalized and prominent.

Roger M. Wakimoto, Ph.D.

Vice Chancellor for Research & Creative Activities



**UNIVERSITY OF ENERGY AND NATURAL RESOURCES, SUNYANI**  
**OFFICE OF THE VICE-CHANCELLOR**  
**CENTRE FOR GRANTS, RESEARCH AND INNOVATION (CeGRI)**

P. O. Box 214, Sunyani

[www.uenr.edu.gh](http://www.uenr.edu.gh)

+233 (0) 550 429 941

[cegri@uenr.edu.gh](mailto:cegri@uenr.edu.gh)

November 7, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Dear Dr. Ordway,

LETTER OF SUPPORT FOR PAN TROPICAL INVESTIGATION OF BIOGEOCHEMISTRY AND  
ECOLOGICAL ADAPTATION (PANGAEA)

I am writing to express my strong support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign: PAN tropical investigation of Ecological Adaptation (PANGAEA). This campaign, if selected, will serve to fill critical training gaps and needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. PANGAEA will also support and reinforce earth observation of forest through satellite imagery, forest biodiversity and conservation, landscape restoration, Non-Timber Forest Products (NTFP) conservation and utilization at the local level for food, energy and medicine, forest resources utilization for indigenous medicine, capacity building and research-related activities led and carried out by the University of Energy and Natural Resources.

The University of Energy and Natural Resources (UENR) is a public funded institution that was established in 2011 in Ghana. Our goal is to promote the development of human resources and skills required to solve the critical energy and natural resources challenges of society and undertake interdisciplinary academic research and outreach programmes in engineering, science, economics and environmental policy. To achieve our objectives, we currently do carbon flux tower monitoring project between atmosphere and tropical forest ([https://eoric.uenr.edu.gh/?bunch\\_projects=carbon-flux-tower-project](https://eoric.uenr.edu.gh/?bunch_projects=carbon-flux-tower-project)) in Bia-Tano Forest Reserve, Ghana, Non-Timber Forest Products cultivation and community development at Lake Bosomtwe, Ghana, Forest Phenology project (in selected forest reserves in Ghana) and Climate Forest Feedbacks Project, also at Bia-Tano Forest Reserve.

We see several aligned efforts and general aims between UENR and PANGAEA, in earth observation research, climate change mitigation and adaptation, forest monitoring and conservation, carbon sequestration research, NTFP research and community development. We look forward to supporting PANGAEA's efforts to leverage earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout

the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

We pursue forest monitoring and conservation, community capacity building for forest management initiatives with local communities, and national institutions and agencies such as Forestry Commission, Forestry Research Institute of Ghana (FoRIG), Environmental Protection Agency (EPA) and Local Government Authorities. These institutions have the legal, regulatory, scientific and technical mandate and capacity to support research, capacity building, data analysis and dissemination activities related to PANGEA. We conduct this initiative in Bia-Tano Forest Reserve, Tain II Forest Reserve, Tinte Bepo Forest Reserve, Bobri Forest Reserve within both moist and dry semi-deciduous forest ecosystems because it is special for habitation of indigenous forest species, biodiversity hotspot and buffers the forest zone from the harsh savannah ecosystems in Northern Ghana. This location may be of strategic importance to PANGEA because of their unique scientific and socioeconomic value. The UENR has been working in this location for twelve years and can facilitate PANGEA's implementation by helping with research, stakeholder engagement, capacity building and community development.

Should PANGEA be funded, UENR can provide in-kind support in the form of research support services, office space, IT services, financial management services and vehicles for travel and 20% of staff time (FTE) estimated at US \$200,000.

While our institution excels at earth observation services (global navigation satellite systems, high performance computing, GIS and data analysis) multidisciplinary research, stakeholder engagement, collecting and analyzing ground-based data, strengthening capacity of local government authorities, we seek to engage in cutting-edge research, training and capacity building in emerging innovative methods and technologies within our area of expertise including leveraging satellite imagery to improve carbon accounting.

We believe that this is an important project with the potential for high impact across the globe and is mutually beneficial to all partners involved. As Director of Research, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common effort.

Name: Peter Sanful PhD

Title: Director of Research

Institution name: University of Energy and Natural Resources

Institution Address: P. O Box 214 Sunyani, Ghana

Signature:





Forest Service  
U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE

INTERNATIONAL PROGRAMS | OFFICE OF THE CHIEF



Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

This letter attests our support for the proposed NASA Terrestrial Ecology Field Campaign entitled PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA). If funded, PANGEA will advance data, methods, applications, training gaps/needs related to the measurement, understanding, and scaling of carbon, water, and energy fluxes in tropical forests and/or their interactions with biodiversity, climate change, human activities. The field campaign will contribute to understanding how tropical forests across the world are responding to changes in climate, land cover and land use. PANGEA's main goals are aligned with U.S. Forest Service International Programs work on sustainable forest management and biodiversity conservation internationally.

U.S. Forest Service International Programs has had long term technical cooperation in the Amazon and Central Africa that has been supported by USAID, Department of State and other donors. U.S. Forest Service International Programs activities include both specific cooperation with countries in the South America and Africa regions as well as pantropical programs such as SilvaCarbon to enhance capacity of tropical forested countries to monitor, measure, and report carbon in their landscapes.

PANGEA is an exciting mission and will advance our understanding of how forests are changing in response to shifts in climate and disturbance regimes. As the Director of International Programs, I confirm my support for the PANGEA Terrestrial Ecology Field Campaign.

Sincerely,

Valdis  
Mezainis

Digitally signed  
by Valdis Mezainis  
Date: 2024.11.22  
08:30:34 -05'00'

Val Mezainis, PhD



Forest Service  
U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE

---

**INTERNATIONAL PROGRAMS | OFFICE OF THE CHIEF**

Director  
Forest Service  
International Programs  
Office of the Chief  
201 14th Street SW, Stop 1127  
Washington DC 20250-1127



01 BP 526, Cotonou, Bénin  
Tel : + 229 21 36 11 19  
[www.uac.bj](http://www.uac.bj)



Abomey-Calavi, 28 November 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles, USA

### **Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

This is to express my strong support for the proposed NASA PANGEA (**PANtropical Investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation**) Terrestrial Ecology Field Campaign. The idea developed is relevant to advance our understanding of biogeochemical cycles in tropical forests, their dynamics and their feedbacks with climate, biodiversity, and human agricultural related activities. PANGEA will be also valuable in completing and reinforcing national and international collaborative research activities led currently by our research group. These are [LMI REZOC](#) a bilateral laboratory between INE (National Institute for Water) of University Abomey-Calavi (UAC) in Bénin and IGE (Institute of Geoscience and Environment, Grenoble, France); and [AMMA-CATCH](#) a regional hydro-meteorological observatory. This observatory has been monitoring since more than ten years water vapor, carbon dioxide fluxes as well weather data across ecosystems spanning from the South to the North of Bénin and Dr. Ossénatou Mamadou is the leader of the beninese flux sites.

Considering that Bénin has a large part of its territory covered by forest, culture and plantations, PANGEA will clearly help to elucidate how land use and land cover changes affect biogeochemical gas fluxes and forest dynamics using ground base data, drone, and remote

sensing products in one of the most understudied regions of West Africa. Bénin is also at the frontier between two large tropical forested ecosystems (the Dahomey Gap), between Guinean and the Central African equatorial forests which offers an unique opportunity for developing a comprehensive understanding of beninese ecosystems.

Our research group has a keen interest and is enthusiastic about PANGEA's vision to combine observation data and multidisciplinary tools, approaches to co-produce and co-create knowledge by engaging local communities. This corroborates with our objectives to promoting scientific collaboration, building capacity for research and monitoring, nurturing the next generation of scientists, developing innovative results applicable to inform climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, ecosystem water-related services, and sustainable land-use practices.

We guarantee that if the PANGEA is funded, our research group, the LMI REZOC and AMMA-CATCH Benin team can offer logistical support across our three sites to validate and improve satellite-derived measurements. LMI REZOC will also directly support these activities through triggering funds and sharing of expertise with the AMMA-CATCH technical staff, permanent in Benin, to survey and collect data of the three sites. We will also provide our long term existing data to collaborate on PANGEA-related studies, which would benefit from dedicated research funding. Finally, we aim to expand opportunities for young beninese scientists by supporting their participation in Master's and Ph.D. programs that utilize flux towers data.

As a local principal investigator of beninese flux sites, I express my undeniable support for this campaign. Finally, we look forward to the possibility of contributing to PANGEA and are persuaded that this collaboration will generate impactful societal results for our country.



Ossénatou MAMADOUE, PhD  
Associate Professor, IMSP/UAC  
Leader of the WAF-Net (West Africa Flux Network)



Global Conservation Program, 2300 Southern Boulevard, Bronx, NY 10460 USA tel: 718-220-5100

**Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGAEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGAEA). If selected, PANGAEA will significantly contribute to the aims of the Wildlife Conservation Society's (WCS) Forests & Climate Change Program.

Established in 1895, WCS is a global 501 non-governmental organization committed to saving wildlife and wild places around the world. WCS leads active projects in more than 50 countries and more than 500 project locations around the world. WCS' Forests and Climate Change Program works to safeguard the long-term integrity of the tropical forest carbon sink, and leads the development of the HIFOR nature finance initiative to scale investments in these climate-critical ecosystems ([www.hifor.org](http://www.hifor.org)).

Several of PANGAEA's goals align closely WCS' priorities, particularly in the development of a broader understanding of risks to the tropical land sink, how these risks vary over space and time, and the determinants of sink dynamics. PANGAEA's planned activities will illuminate crucial relationships between tropical forest integrity, biodiversity, anthropogenic pressures, and resistance and resilience to climate variability that will inform WCS' efforts to implement effective, durable, and equitable forest conservation solutions. We are therefore eager to support PANGAEA's use of Earth observation and multidisciplinary approaches to fill these knowledge gaps.

WCS currently collaborates with community, civil society, and government partners on the development, piloting, and scaling of HIFOR nature finance in more than 50 countries. Our partnerships and the unique qualities of these ecosystems may be of strategic importance to PANGAEA's objectives, as our shared expertise and WCS's longstanding regional experience will provide strong local support for PANGAEA's implementation.

If PANGAEA is selected, WCS can provide in-kind support, including data -sharing and assistance with local logistics. Our team is also prepared to explore collaborative funding opportunities to participate in PANGAEA-related research and applications activities.

We believe PANGAEA represents a project with high potential impact. As the Executive Director of the Forests and Climate Change Program at WCS, I offer my full support for the PANGAEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGAEA will facilitate this valuable partnership and further our shared climate and biodiversity conservation goals.

Sincerely,

Signed by:  
  
 3407CE182A204FE...

Daniel J. Zarin, Ph.D.

Executive Director, Forests and Climate Change

November 29, 2024

Dr. Elsa Ordway  
Assistant Professor, Ecology & Evolutionary Biology  
University of California Los Angeles  
410K Botany Building  
Los Angeles, CA, 90095  
USA

Subject: Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)

Dear Dr. Ordway,

I am writing to convey my strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will address essential gaps in data, methodology, and training, advancing our ability to measure, understand, and scale carbon cycle dynamics in tropical forests and their interactions with biogeochemical cycles, biodiversity, climate change, disturbance events, and human activities. PANGEA will also strengthen and enhance tropical forest conservation initiatives in the Democratic Republic of Congo and Brazil led by the Woodwell Climate Research Center (Woodwell Climate).

Woodwell Climate Research Center conducts science for solutions at the nexus of climate, people and nature. We partner with leaders and communities for just, meaningful impact to address the climate crisis. For nearly 40 years, we have combined hands-on experience and policy impact to identify and support societal-scale solutions that can be put into immediate action. Woodwell Climate was established in 1985 as the Woods hole Research Center. To achieve our objectives, Woodwell Climate conducts basic and applied research on the biophysical, economic, and social systems affecting tropical forest and land use dynamics in the Amazon ( since 1985) and Congo (since 2008) Basins.

The Tropics team at Woodwell Climate see several aligned efforts and goals between Woodwell and PANGEA, in particular tropical forest and carbon cycle resilience and the role of biodiversity in maintaining healthy forests. We look forward to supporting PANGEA's efforts to leverage Earth observation and multidisciplinary data and methods to conduct research. We are particularly excited at the prospects of engaging with diverse communities throughout the tropics to advance scientific understanding, strengthen capacity for research and monitoring, and support the application of scientific results for climate mitigation, adaptation, biodiversity conservation, and sustainable land-use practices.

Woodwell Climate conducts its research with local partners/institutions such as the Amazon Environmental Research Institute in Brazil (IPAM), the Congo Regional Post-Graduate Training School on Integrated Management of Tropical Forests and Lands ([ERAIFT](#)), and Congo Basin Water Resources Research Center ([CRREBaC](#)). We carry out this work in mixed use landscapes consisting of native forest, large scale industrial agriculture, traditional uses, and cattle pasture. The remaining forests in these regions contain the bulk of the world's terrestrial biodiversity and play a crucial but still not well understood role in regulating our climate. These partnerships and locations may be of strategic



importance to PANGEA because of long term research programs and well-established connections to local research, community organisations, and policy management institutions. Woodwell Climate's deep experience in these landscapes and on these topics can facilitate PANGEA's implementation by supporting research, training, and capacity building.

If PANGEA is selected to move forward, Woodwell Climate can provide in-kind support in the form of internal grants and grants to our institution from private foundations and individuals to support participation in PANGEA-related research activities.

While Woodwell Climate excels at collecting and analyzing ground-based and satellite data, strengthening capacity of local students, researchers, and land managers, we seek to engage in leveraging satellite imagery to improve our understanding of the processes of forest degradation and the overall importance of forests for climate and agricultural productivity.

We believe that PANGEA is an important project with the potential for high impact. As Director of the Tropics Program, I express my utmost support for the PANGEA campaign and hope that NASA's support of PANGEA will enable us to pursue this common interest.

Michael T. Coe

Director of the Tropics Program  
Woodwell Climate Research Center  
149 Woods Hole Rd, Falmouth, MA, 02540



**Subject:**

**Letter of Support for PAN tropical investigation of bioGeochemistry and Ecological Adaptation (PANGEA)**

Dear Dr. Ordway,

We are writing to express our strong support for NASA's proposed Terrestrial Ecology Field Campaign, PAN Tropical Investigation of Ecological Adaptation (PANGEA). If selected, PANGEA will significantly benefit our Global Forest Watch and Land & Carbon Lab's initiatives, as led by the World Resources Institute (WRI).

WRI is a non-profit environmental think tank, incorporated under the laws of Delaware, USA, that goes beyond research to create practical ways to protect the earth and improve people's lives. WRI is committed to move human society to live in ways that protect Earth's environment and its capacity to provide for the needs and aspirations of current and future generations.

Our team pursues the development of high-quality information about land and its associated values (e.g. carbon, biodiversity) and make these universally accessible and useful for people worldwide, so as to empower them to manage landscapes sustainably and improve the livelihoods of local people through active projects in Food Land & Water Department especially Global Forest Watch and Land & Carbon Lab.

Several of PANGEA's goals align closely with ongoing efforts at WRI, particularly the Land & Carbon Lab and Global Forest Watch of improved land cover data, land cover changes and the impacts of these changes on biodiversity, carbon and people. We are eager to work with PANGEA to share our data, work in cooperation to develop new data, scale PANGEA data on our platforms, help get data used in our wide network and cooperate on advances in Earth observation capabilities and collaborative multidisciplinary approaches to understanding tropical forest, peatland, and wetland responses to global environmental change.

WRI currently collaborates on Global Forest Watch and the Land & Carbon Lab with many local and international partners as the University of Maryland, University of Minnesota, Purdue University, Cornell university, Wageningen University, German Research Centre for Geosciences, NASA,



Google, Meta and international partners including ESA, IFPRI, World Bank and UN FAO. WRI's deep experience developing breakthroughs in geospatial mapping that power local-to-global solutions by making those capabilities accessible will provide critical support for PANGEA's translation of science to action.

If PANGEA is selected, WRI can provide in-kind support through expertise, data sharing, partnership engagement and user testing. Our team is also prepared to explore funding opportunities to participate in PANGEA-related research and applications activities.

We see an opportunity for PANGEA's focus on advancing carbon, biodiversity, and agricultural remote-sensing capabilities in the tropics to further our goals, such as enhance crop-type/yield mapping, biodiversity assessments, carbon flux mapping and supporting supply chain traceability.

We believe PANGEA represents a project with high potential impact. As Director of Partnership and Innovation for Land& Carbon Lab at WRI, we offer our full support for the PANGEA campaign and hope that NASA's endorsement of PANGEA will facilitate this valuable partnership and further our shared land, climate and biodiversity conservation goals.

Dr. Fred Stolle  
Director Innovation & Partnership GFW/LCL  
World Resources Institute  
10 G street, NE, Suite 800, Washington DC, 20002,

## B. Mitra dan Kegiatan Keterlibatan PANGEA

**Tabel B-1.** Gambaran umum strategi pelibatan dan contoh mitra untuk setiap kelompok sasaran

KOMUNITAS	DESKRIPSI	RELEVANSI DENGAN PANGEA	STRATEGI & SASARAN KETERLIBATAN	CONTOH MITRA
<b>NASA</b>	Program Penelitian & Analisis dan Aksi Bumi NASA, Program Pengembangan Kapasitas NASA, dan inisiatif NASA	NASA adalah kekuatan pendorong di balik PANGEA	Memajukan pemahaman ilmiah, kalibrasi, dan validasi, pengembangan algoritme dan produk, kemitraan, dan pengembangan kapasitas di seluruh perusahaan NASA melalui pendekatan integratif.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ekologi Terrestrial, Keanekaragaman Hayati &amp; Konservasi Ekologi, Tutupan Lahan NASA dan Perubahan Penggunaan Lahan (LCLUC), Hidrologi</li> <li>• Sistem Pemantauan Karbon, Iklim &amp; Ketahanan, Bencana, Kebakaran Hutan, Panen NASA, Sumber Daya Air</li> <li>• SERVIR, ARSET, PENGEMBANGAN, GLOBAL, Prakarsa Masyarakat Adat</li> </ul>
<b>LEMBAGA PEMERINTAH AS LAINNYA</b>	Badan penelitian dan pengembangan federal AS non-NASA	Banyak lembaga pemerintah AS mendukung upaya penelitian dan pelatihan yang secara langsung sejalan dengan PANGEA	Berkoordinasi dengan manajer program untuk mengidentifikasi peluang bagi permintaan antar lembaga di mana kegiatan penelitian dan aplikasi saling menguntungkan.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DOE NGEE-Daerah Tropis*</li> <li>• NSF BIO, GEO, SBE, GOLD-EN, RISE</li> <li>• USAID CARPE, USAID-PEER**</li> <li>• USFS-Program Internasional</li> <li>• USGS SilvaCarbon</li> </ul>
<b>BADAN ANTARIKSA INTERNASIONAL DAN FASILITAS PENDUKUNG</b>	Badan antariksa non-NASA dan lembaga federal yang mendukung pemantauan satelit dan kapasitas teknis.	Para mitra ini secara aktif berkolaborasi dengan NASA dalam berbagai misi satelit dan kampanye udara. PANGEA adalah kesempatan untuk memperkuat dan memperluas kemitraan ini.	Mendukung kolaborasi internasional dalam misi bersama dan kampanye udara yang sudah ada; membangun kapasitas untuk mendukung keterlibatan yang lebih besar antara NASA dan badan antariksa di daerah tropis.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observatorium Satelit Hutan Afrika Tengah (OSFAC)</li> <li>• Badan Antariksa Gabon (AGEOS)</li> <li>• Badan Antariksa Eropa (ESA)</li> <li>• Badan Antariksa Nasional Prancis (CNES)</li> <li>• Pusat Kedirgantaraan Jerman (DLR)</li> <li>• Organisasi Penelitian Antariksa India (ISRO)</li> <li>• Institut Nasional Brasil untuk Penelitian Antariksa (INPE)</li> <li>• Badan Eksplorasi Kedirgantaraan Jepang (JAXA)</li> </ul>

KOMUNITAS	DESKRIPSI	RELEVANSI DENGAN PANGEA	STRATEGI & SASARAN KETERLIBATAN	CONTOH MITRA
<b>LEMBAGA PEMERINTAH ASING DAN LEMBAGA PENELITIAN NASIONAL</b>	Kementerian sektoral nasional & lokal; lembaga khusus geospasial; platform multi-pemangku kepentingan yang dipimpin oleh pemerintah	Para mitra ini mengambil tindakan berskala besar (perencanaan dan pemodelan ekonomi dan lingkungan, penegakan hukum, investasi dalam penelitian, dan lain-lain), dan mendukung data dan analisis jangka panjang (misalnya cuaca).	Menginformasikan pertanyaan dan kegiatan ilmiah PANGEA melalui lembaga-lembaga penelitian; menetapkan kondisi yang memungkinkan (kelembagaan, keuangan, dan program) untuk kepemilikan hasil penelitian PANGEA; pengembangan kapasitas untuk staf di tingkat nasional dan lokal.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Institut Nasional Penelitian Amazon Brasil (INPA)</li> <li>• Observatorium Nasional Kamerun untuk Perubahan Iklim (ONACC)</li> <li>• Kemitraan Hutan Basin Kongo (Congo Basin Forest Partnership/CBFP)</li> <li>• Pusat Penelitian Ilmiah dan Teknologi Nasional Gabon (CENAREST)</li> <li>• Satuan Tugas Gubernur untuk Iklim dan Hutan (GCF-TF)</li> <li>• Kementerian Lingkungan Hidup, Hutan, Fauna, Pertanian, dan Riset Ilmiah</li> <li>• Peruvian Mancomunidad Regional Amazónica</li> <li>• Yayasan Penelitian São Paulo (FAPESP)</li> </ul>
<b>INSTITUSI ILMIAH</b>	Universitas dan perguruan tinggi; laboratorium nasional; lembaga penelitian	Para mitra ini memfasilitasi transfer pengetahuan dan teknologi untuk menghasilkan kapasitas di lembaga-lembaga lokal dan regional untuk melatih generasi ilmuwan berikutnya	Bersama-sama mengembangkan penelitian, analisis, dan aplikasi dengan para mitra ini, dan akan memperkuat kapasitas penelitian lokal dengan mendukung manajemen data, pengembangan infrastruktur, dan pelatihan peneliti karir awal di institusi lokal dan regional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lembaga Penelitian Sumber Daya Hayati Alexander von Humboldt</li> <li>• Aliansi Bioversity International &amp; CIAT</li> <li>• Institut Teknologi Amazon (AmIT)</li> <li>• Institut Lembah Kongo (Congo Basin Institute/CBI)</li> <li>• Institut Penelitian Nasional Prancis untuk Pertanian, Pangan dan Lingkungan (INRAE)</li> <li>• Institut Internasional untuk Pertanian Tropis (IITA)</li> <li>• K. Lisa Yang Pusat Konservasi Bioakustik</li> <li>• LBA</li> <li>• Universitas Katolik Kepausan Peru (PUCP)</li> <li>• Pusat Penelitian Iklim Woodwell</li> </ul>

KOMUNITAS	DESKRIPSI	RELEVANSI DENGAN PANGEA	STRATEGI & SASARAN KETERLIBATAN	CONTOH MITRA
<b>PRAKARSA PENELITIAN INTERNASIONAL TERKOORDINASI</b>	Konsorsium penelitian; jaringan; jaringan dari jaringan	Para mitra ini bekerja dalam skala besar yang selaras dengan tujuan transdisipliner dan pantropis PANGEA.	Menyelaraskan upaya dengan para mitra ini untuk memastikan kegiatan PANGEA secara strategis mengisi kesenjangan yang dibutuhkan dan bukannya duplikasi upaya.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aliansi untuk Ilmu Pengetahuan Hutan Tropis (ATFS)</li> <li>• AndesFlux</li> <li>• NAIK</li> <li>• Prakarsa Ilmu Pengetahuan Cekungan Kongo (Congo Basin Science Initiative, CBSI)</li> <li>• CongoFlux</li> <li>• Jaringan Regional FLUXNET (mis., AmeriFlux, ICOS, AsiaFlux)</li> <li>• GEO-TREES</li> <li>• Guyafor</li> <li>• Guyaflux</li> <li>• Inisiatif One Forest Vision (OFVi)</li> <li>• Jaringan Fluks Afrika Barat</li> </ul>
<b>ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL</b>	Lembaga swadaya masyarakat (LSM) nasional dan internasional serta inisiatif penelitian nonpemerintah yang hadir di negara target	Para mitra ini memfasilitasi konsolidasi pengetahuan tentang karbon, keanekaragaman hayati, dan sistem sosial-ekologi; menerjemahkan hasil penelitian ke dalam kampanye dan aksi yang dipimpin oleh CSO yang sedang berlangsung	Bersama-sama menghasilkan aplikasi yang memanfaatkan kemajuan ilmiah dan teknis PANGEA.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conservation International</li> <li>• CTrees</li> <li>• World Resources Institute (termasuk Global Forest Watch &amp; Land and Carbon Lab)</li> <li>• MapBiomass</li> <li>• Organisasi Konservasi Mamalia Kecil</li> </ul>
<b>ALIANSI DAN ORGANISASI MASYARAKAT ADAT DAN KOMUNITAS LOKAL</b>	Organisasi dan aliansi yang dipimpin oleh masyarakat adat, komunitas lokal, dan perempuan yang aktif di negara-negara target	Para mitra ini terhubung dengan komunitas, pemimpin, dan mitra yang relevan di negara-negara yang ditargetkan	Merancang bersama pertanyaan dan aplikasi sains yang secara langsung memengaruhi IPLC, perempuan, dan kelompok lainnya; merancang bersama kegiatan kampanye lapangan di darat dan udara di wilayah dan komunitas lokal; memberikan pelatihan untuk memberdayakan IPLC dalam pengumpulan data, penelitian, dan komunikasi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aliansi Global Komunitas Teritorial</li> <li>• Inisiatif Hak dan Sumber Daya</li> <li>• Sekolah CBI untuk Pengetahuan Adat dan Lokal (SILK)</li> <li>• Dynamique des Groupes des Peuples Autochtones (DGPA-DRC)</li> </ul>

KOMUNITAS	DESKRIPSI	RELEVANSI DENGAN PANGEA	STRATEGI & SASARAN KETERLIBATAN	CONTOH MITRA
<b>KOMUNITAS DONOR</b>	Donor klasik (bilateral, yayasan keluarga, organisasi filantropi)  Badan-badan khusus (geospasial) dari negara-negara donor	Para mitra ini menggalang dana pelengkap yang menawarkan dukungan yang ditargetkan untuk memperluas PANGEA di luar dukungan dana NASA.	Target investasi dalam aplikasi PANGEA dan pengembangan produk, dukungan untuk kolaborator internasional, lokakarya bersama, dan pengembangan alat pengumpulan dan pengelolaan data IPLC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezos Earth Fund</li> <li>• Ford Foundation</li> <li>• Donor perorangan</li> <li>• Mellon Foundation</li> <li>• Moore Foundation</li> <li>• Badan Norwegia untuk Kerjasama Pembangunan (Norad)</li> <li>• Prakarsa Iklim dan Hutan Internasional Norwegia (NICFI)</li> </ul>
<b>SEKTOR SWASTA</b>	Agribisnis, industri ekstraktif, perusahaan energi, perusahaan data besar, lembaga investasi, dan perusahaan ekowisata	Para mitra ini adalah pengambil tindakan dan pengambil keputusan yang penting dengan dampak yang luas.	Bekerja sama dengan NASA dan mitra aplikasi untuk menentukan strategi yang paling tepat untuk melibatkan sektor swasta dalam berbagai hasil aplikasi.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meja Bundar tentang Minyak Kelapa Sawit, Kakao, Kedelai, Biomaterial yang Berkelanjutan</li> <li>• Unilever</li> <li>• Olam</li> <li>• Sumber Daya Hijau</li> <li>• CNaught</li> <li>• Ekuitas Karbon</li> <li>• Modal Kredit Karbon</li> </ul>
<b>LEMBAGA-LEMBAGA ANTAR PEMERINTAH</b>	Organisasi yang terdiri dari beberapa pemerintah berdaulat yang berkolaborasi untuk mengatasi masalah bersama, mengembangkan kebijakan, dan mengoordinasikan tindakan dalam skala regional atau global	Para mitra ini memberikan penilaian berbasis ilmu pengetahuan yang otoritatif yang menginformasikan keputusan kebijakan global dan memandu upaya internasional untuk memerangi perubahan iklim dan mempromosikan pembangunan berkelanjutan dan planet yang tangguh.	Terus ikuti perkembangan laporan dan kegiatan penilaian untuk memastikan hasil penelitian dan aplikasi PANGEA dapat dimanfaatkan secara efektif.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Komite Satelit Pengamatan Bumi (CEOS)</li> <li>• Kelompok Pengamatan Bumi (GEO)</li> <li>• Panel Antarpemerintah tentang Perubahan Iklim (IPCC)</li> <li>• Platform Kebijakan-Sains Antar Pemerintah tentang Keanekaragaman Hayati dan Jasa Ekosistem (IPBES)</li> <li>• Persatuan Internasional untuk Konservasi Alam (IUCN)</li> <li>• Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim (UNFCCC)</li> </ul>

\* DOE NGEE-Tropis memasuki Fase 3 dan akan berakhir ketika PANGEA dimulai, sehingga memungkinkan kesinambungan yang penting dalam membatasi ketidakpastian model dan upaya integrasi data-model.

\*\* USAID PEER akan digantikan oleh program baru bernama SPARK.

## C. Keterlibatan selama Studi Pelingkupan

Kampanye Pelingkupan PANGEA merupakan upaya kolaboratif yang melibatkan lebih dari 800 individu dari 396 lembaga yang mencakup lebih dari 60 negara di 5 benua (**Tabel C-1**) melalui (1) kelompok kerja internasional, (2) acara berbagi informasi singkat, (3) lokakarya konsultatif selama beberapa hari, dan (4) pertemuan bilateral dengan mitra potensial. Upaya pelingkupan PANGEA dimulai pada November 2023, dengan sebuah webinar pembuka. Kegiatan-kegiatan selanjutnya pada tahun 2024 dijelaskan di bawah ini.

### Kelompok Kerja Internasional

Lebih dari 200 orang berpartisipasi dalam setidaknya satu dari lebih dari 60 sesi Pertemuan Kelompok Kerja PANGEA yang diselenggarakan secara virtual oleh para Ketua Kelompok Kerja. Pada awal kampanye pelingkupan, 7 kelompok kerja yang berbeda meminta masukan dari komunitas ilmiah dan komunitas yang lebih luas:

- Umpan Balik dan Interaksi Iklim: 158 keterlibatan
- Siklus Biogeokimia dan Dinamika Karbon: 155 keterlibatan
- Struktur, Fungsi, dan Keanekaragaman Hayati Ekosistem: 101 keterlibatan
- Sistem Sosial-Ekologi: 91 keterlibatan
- Pemodelan dan Sintesis Data: 141 keterlibatan
- Keterlibatan Masyarakat dan Aplikasi Penelitian: 110 keterlibatan
- Kelayakan: 79 keterlibatan

Keterlibatan didefinisikan untuk mencatat kehadiran unik seorang peserta dalam rapat Kelompok Kerja yang unik. Misalnya, tiga peserta unik dalam pertemuan yang sama atau satu peserta unik dalam tiga pertemuan berturut-turut, keduanya memiliki bobot yang sama sebagai 3 keterlibatan. Oleh karena itu, definisi ini mencakup berbagai interaksi dengan peserta kelompok kerja yang lebih mewakili kombinasi kontribusi online dan offline dalam pengembangan tema dan tujuan Kelompok Kerja.

Kelompok kerja Keterlibatan Masyarakat dan Aplikasi Penelitian (CERA) terdiri dari mahasiswa, peneliti, dan profesor dari institusi akademik, praktisi dari organisasi non-pemerintah dan antarpemerintah, dan beberapa perwakilan sektor swasta. Serupa dengan kelompok kerja PANGEA lainnya, keanggotaan CERA terbuka dan diiklankan secara online, di acara-acara PANGEA, dan melalui "promosi dari mulut ke mulut." Sekitar 100 orang mendaftar menjadi anggota kelompok kerja CERA dan berpartisipasi dalam satu atau lebih dari 12 pertemuan CERA yang dilakukan secara online dan/atau berkontribusi pada dokumen kolaboratif tim. Banyak anggota juga berpartisipasi dalam sesi yang relevan dengan CERA pada lokakarya PANGEA yang berlangsung selama beberapa hari di Kamerun, Amerika Serikat, Brasil, dan Peru.

### Acara Berbagi Informasi

Tim Kepemimpinan PANGEA berinteraksi dengan ratusan orang melalui dua belas acara berbagi informasi yang diadakan di lima benua. -Acara-acara ini mencakup sesi presentasi dan diskusi selama

1-2 jam di konferensi akademik internasional, webinar, acara regional, dan pertemuan khusus yang diselenggarakan oleh komunitas PANGEA.

Melibatkan masyarakat adat dalam proses pelingkupan untuk mendiskusikan ilmu pengetahuan yang dihasilkan bersama, kedaulatan data, kepentingan dalam pelatihan, dan aspek-aspek penting dalam proses tersebut merupakan bagian penting dari proses pelingkupan PANGEA. Karena negara-negara tertentu yang akan menjadi fokus PANGEA tidak akan ditentukan hingga pengembangan Rencana Percobaan Ringkas, keterlibatan awal difokuskan pada organisasi perbatasan, aliansi, dan pemimpin masyarakat. Organisasi utama yang terlibat dalam pelingkupan PANGEA adalah Aliansi Global Komunitas Teritorial. Pertemuan rutin diadakan dengan para pemimpin GATC, termasuk para pemimpin gerakan Perempuan dan Pemuda di dalam GATC. Pertemuan-pertemuan ini selalu diadakan dengan penerjemahan dan dokumen serta email dibagikan dalam bahasa Inggris, Perancis, Spanyol, Portugis, dan Brasil. Sebuah pertemuan tatap muka diadakan pada COP16 dengan beberapa anggota GATC untuk mendiskusikan lebih lanjut mengenai PANGEA dan mengidentifikasi langkah-langkah selanjutnya yang tepat jika PANGEA terpilih. Pertemuan lanjutan akan diadakan pada bulan Januari untuk membahas tahun pelingkupan dengan pimpinan GATC. Pertemuan juga diadakan dengan Rights and Resources Initiative (RRI) yang berfokus pada pemberdayaan dan pelibatan masyarakat adat, masyarakat keturunan Afrika, masyarakat lokal, dan para perempuan di komunitas-komunitas tersebut. Selain itu, PANGEA mengadakan Lokakarya dengan Masyarakat Adat di Panama, yang mempertemukan 12 peserta dan perwakilan dari wilayah Embera, Wounaan, dan Guna di Smithsonian Tropical Research Institute pada tanggal 26 April 2024. Pertemuan gabungan antara pertemuan tatap muka dan daring ini diselenggarakan secara virtual oleh Tim Kepemimpinan PANGEA dan dihadiri oleh 10 peserta Zoom dari 7 negara. Jika PANGEA terpilih, tidak diragukan lagi akan ada lebih banyak komunitas yang dapat dilibatkan dalam lanskap PANGEA. Namun, pekerjaan ini meletakkan dasar untuk mengembangkan kemitraan tersebut.

Daftar acara berbagi informasi:

- **Balai kota, presentasi, dan simposium secara langsung di konferensi:**
  - American Geophysical Union (AGU) 2023 & 2024 (akan datang) - San Francisco, CA, dan Washington DC
  - Association for Tropical Biology and Conservation (ATBC) - Kigali, Rwanda, Juli 2024
  - Presentasi Pertemuan Para Pihak ke-20 Kemitraan Hutan Basin Kongo (CBFP) - Kinshasa, Republik Demokratik Kongo (Juni 2024)
  - Ecological Society of America (ESA) - Long Beach, CA
  - European Geophysical Union (EGU) - Wina, Austria (April 2024)
  - Global Land Programme (GLP) (5 November 2024) - Oaxaca, Meksiko
  - International Union of Forest Research Organizations (IUFRO) - Stockholm, Swedia
  - Pertemuan Keanekaragaman Hayati dan Konservasi Ekologi NASA di Maryland, Mei 2024
  - Smithsonian Tropical Research Institute, Simposium Peringatan 100 Tahun Pulau Barro Colorado (BCI 100) - Gamboa, Panama (Juni 2024)
- **Balai kota virtual:**
  - PANGEA - balai kota yang terbuka untuk semua
  - PANGEA - balai kota khusus kelompok kerja
  - Balai kota online ESA (Maret 2024)

- **Bengkel yang lebih kecil:**
  - Sesi virtual perempuan Afrika untuk menyoroti penelitian yang dipimpin oleh perempuan di Afrika Tengah (April 2024)
  - Pertemuan dengan Masyarakat Adat di Panama (April 2024)
  - Pertemuan SBG Collab dengan mitra masyarakat adat dan masyarakat (Juni 2024)
  - Pekan Mamologi Kulit Hitam bersama ilmuwan kulit hitam (September 2024)
  - Pertemuan rutin dengan pimpinan Aliansi Global Komunitas Teritorial (GATC) (Juli-November 2024)
- **Pertemuan Tim Sains NASA:**
  - ECOSTRESS
  - EMIT
  - GEDI
  - OCO
  - SBG
  - SMAP

## **Lokakarya Konsultatif Multiday**

Tim Kepemimpinan PANGEA menyelenggarakan empat lokakarya pelingkupan regional selama beberapa hari yang mencakup sesi yang berfokus pada praktik terbaik pelibatan masyarakat serta permintaan dan preferensi regional untuk aplikasi penelitian. Lokakarya Pelingkupan PANGEA mencakup acara 3 hari di Yaoundé, Kamerun pada Februari 2024; acara 3 hari di Washington, DC pada April 2024; lokakarya 3 hari di Manaus, Brasil pada Mei 2024; dan lokakarya 2 hari di Lima, Peru. Semua kegiatan tersebut diselenggarakan melalui kerja sama yang erat dengan mitra lokal PANGEA yang mewakili komunitas akademik, lembaga pemerintah, dan lembaga swadaya masyarakat. Kegiatan lokakarya dihadiri oleh 263 peserta langsung dari 30 negara pada konsultasi regional yang diselenggarakan di Kamerun (90), Washington DC (103), Panama (10), dan Lima (60). Ketika peralatan dan agenda memungkinkan, acara-acara interaktif ini diperluas ke audiens virtual yang lebih luas dengan keterlibatan 362 peserta virtual tambahan dari 33 negara pada konsultasi regional di Kamerun (54), Washington DC (298), dan Panama (10). Semua acara kecuali lokakarya di Manaus, Brasil menyediakan layanan penerjemahan untuk mengakomodasi para pembicara yang tidak berbahasa Inggris.

Lokakarya Kamerun yang diselenggarakan pada 21-22 Februari 2024 di Hotel Mont Fébé menarik partisipasi dari 90 peserta dari 16 negara yang menghadiri acara yang diselenggarakan bersama CIFOR, IITA, dan Universitas Yaoundé. Sesi hibrida diikuti oleh 54 peserta Zoom tambahan. Lokakarya DC yang diselenggarakan pada 9-11 April 2024, di markas besar AGU dihadiri oleh 103 peserta dari 16 negara. Lokakarya yang sepenuhnya bersifat hibrida ini mencakup dialog dan partisipasi dari 297 peserta Zoom selama 3 hari. Lokakarya Lima yang diselenggarakan pada tanggal 3-4 Juni 2024, di Pusat Kebudayaan PUCP dihadiri oleh 60 peserta dari 8 negara. Lokakarya Lima diselenggarakan melalui kerja sama dengan Governors' Climate and Forests Task Force (GCF-TF) dan merupakan kesempatan penting untuk menghadirkan lokakarya yang dihadiri secara merata oleh para ilmuwan dan pembuat kebijakan. Para gubernur dari Peru, Kolombia, Bolivia, Brasil, dan Ekuador hadir dalam

pertemuan tersebut, yang memberikan wawasan yang tak ternilai mengenai potensi hasil-hasil Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi dari PANGEA di Amazon.

Daftar lokakarya konsultatif multiday PANGEA:

- Lokakarya 3 hari Konsultasi Regional Afrika, Yaoundé, Kamerun, Februari 2024
- Lokakarya 3 hari Pelingkupan PANGEA, Washington, DC, April 2024
- Lokakarya 4 hari tentang Iklim Amazon, Manaus, Brasil, Mei 2024
- Lokakarya 2 hari regional PANGEA/Gubernur' Climate & Forests Task Force (GCFTF) Amerika di Lima, Peru, Juni 2024
- Konsultasi Regional Asia melalui partisipasi dalam lokakarya SERVIR selama 3 hari, Bangkok, Thailand, Juli, 2024

## Pertemuan Bilateral dengan Mitra Potensial PANGEA

Tim Kepemimpinan PANGEA dan anggota kelompok kerja CERA mengadakan pertemuan bilateral dengan ratusan mitra potensial PANGEA, termasuk badan-badan federal AS, Badan Antariksa Eropa, SERVIR, perusahaan swasta, lembaga penelitian AS dan internasional, organisasi konservasi, kementerian, dan banyak lagi. Organisasi dan lembaga tersebut tercantum dalam **Tabel C-1**. Banyak mitra (n=58) telah memberikan surat dukungan untuk mengkonfirmasi minat mereka dalam berkolaborasi dalam program PANGEA (jika didanai).

**Tabel C-1.** Semua organisasi dan lembaga yang terlibat dalam proses pelingkupan PANGEA.

ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL Organisasi Masyarakat Sipil

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
1	Universitas Aarhus (Denmark)	Universitas
2	ACCA: Konservasi Amazon (Peru)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
3	ADC: Association Action for Community Development (Kamerun)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
4	ADPC: Pusat Kesiapsiagaan Bencana Asia	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
5	Jaringan Lingkungan Hidup Afrika	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
6	AGEOS: Badan Studi dan Pengamatan Antariksa (Gabon)	Pemerintah
7	AGU: Persatuan Geofisika Amerika	Masyarakat
8	Universitas Akamai	Universitas
9	Universitas Akdeniz (Turki)	Universitas
10	Aliansi Keanekaragaman Hayati - CIAT: Aliansi Bioversitas Internasional dan Pusat Pertanian Tropis Internasional (Italia)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
11	AmlT: Institut Teknologi Amazon (Brasil)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
12	Anawakalmekak	Sekolah K-12
13	ANI: Africa Nature Investor Foundation (Nigeria)	Donor

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
14	Koneksi Arbimon/Rainforest	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
15	ARES: Fasilitas Penelitian Udara untuk Sistem Bumi	Universitas
16	ASU: Universitas Negeri Arizona	Universitas
17	ATBC Asosiasi untuk Biologi dan Konservasi Tropis	Masyarakat
18	BAERI: Institut Penelitian Lingkungan Hidup Bay Area	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
19	Bezos Earth Fund	Donor
20	BHI: Pusat Keanekaragaman Hayati Internasional	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
21	Ahli mamalia hitam	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
22	Universitas Boston	Universitas
23	Caltech: Institut Teknologi California	Universitas
24	Universitas Calvin	Universitas
25	Kementerian Lingkungan Hidup Kamerun	Pemerintah
26	CAPC-AC: Pusat Aplikasi dan Prakiraan Iklim Afrika Tengah (Uni Afrika)	Multilateral
27	Carboneers (Belanda)	Penelitian
28	Carnegie Institution for Science	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
29	Institut Studi Ekosistem Cary	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
30	CBCS: Masyarakat Konservasi Cekungan Kongo (Dem. Rep. Kongo)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
31	CBD: Konvensi Keanekaragaman Hayati	Multilateral
32	CBFP: Kemitraan Hutan Basin Kongo	Multilateral
33	CBI: Institut Basin Kongo	Multilateral
34	CBSI: Prakarsa Sains Cekungan Kongo	Multilateral
35	CEAS Pusat Studi Amazonia Berkelanjutan	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
36	CEEAC: Komunitas Ekonomi Negara-Negara Afrika Tengah (Uni Afrika)	Multilateral
37	CENAREST: Pusat Penelitian dan Teknologi Ilmiah Nasional (Gabon)	Pemerintah
38	CEW: Cameroon Environmental Watch (Cameroon)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
39	CGIAR: Kelompok Konsultatif untuk Penelitian Pertanian Internasional	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
40	Universitas Chapman	Universitas
41	CI: Conservation International	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
42	CICERO: Pusat Penelitian Iklim dan Lingkungan Internasional Oslo (Norwegia)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
43	CIFOR-ICRAF: Pusat Penelitian Kehutanan Internasional dan Agroforestri Dunia	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
44	CIRAD: Pusat Penelitian Pertanian untuk Pembangunan Internasional (Prancis)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
45	CIRES: Lembaga Koperasi untuk Penelitian Ilmu Lingkungan	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
46	CIRMF: Centre International de Recherches Médicales de Franceville	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
47	Jam Iklim RDK (Republik Demokratik Kongo)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
48	Fokus Iklim	Industri Swasta
49	CMEC: Kemampuan Evaluasi Model Terkoordinasi	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
50	CNPq: Dewan Nasional untuk Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (Brasil)	Pemerintah
51	CoEB: Pusat Keunggulan dalam Keanekaragaman Hayati dan Pengelolaan Sumber Daya Alam (Rwanda)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
52	College of William & Mary	Universitas
53	Universitas Columbia	Universitas
54	COMIFAC: Komisi Kehutanan Afrika Tengah	Multilateral
55	Aksi Kongo Untuk Alam (Dem. Rep. Kongo)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
56	Cordon Grande Forest Ejido (Meksiko)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
57	Universitas Cornell	Universitas
58	CRDPI: Pusat Penelitian Produktivitas dan Keberlanjutan Hutan Tanaman Industri (Rep. Kongo)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
59	CSU: Universitas Negeri Colorado	Universitas
60	CTrees	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
61	CUNY: City University of New York	Universitas
62	Universitas Denis Sassou Nguesso (Rep. Kongo)	Universitas
63	DOE: Departemen Energi A.S.	Pemerintah
64	Universitas Duke	Universitas
65	Universitas Carolina Timur	Universitas
66	Konsultasi Lingkungan	Industri Swasta
67	Pertanian Ramah Lingkungan	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
68	Merek Bioteknologi Ecobed	Industri Swasta

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
69	EDA: Mengaktifkan Tindakan Nonaktifkan	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
70	EEZA: Stasiun Percobaan Zona Gersang (Spanyol)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
71	EGU: Persatuan Geofisika Eropa	Masyarakat
72	Embrapa: Perusahaan Penelitian Pertanian Brasil (Brasil)	Pemerintah
73	Universitas Emory	Universitas
74	ENEF-Gabon: Sekolah Nasional Air dan Hutan Gabon (Gabon)	Pemerintah
75	ERAIFT: Sekolah Pelatihan Pasca Sarjana Regional tentang Pengelolaan Terpadu Hutan dan Lahan Tropis (Dem. Rep. Kongo)	Universitas
76	ESA: Masyarakat Ekologi Amerika (Ecological Society of America)	Masyarakat
77	ESA: Badan Antariksa Eropa	Pemerintah
78	ESRI: Environmental Systems Research Institute, Inc.	Industri Swasta
79	ETH Zurich: Institut Teknologi Federal Zurich (Swiss)	Universitas
80	FAP: Angkatan Udara Peru (Peru)	Pemerintah
81	FAPEAM: Yayasan Penelitian Amazonas (Brasil)	Pemerintah
82	FAPESP: Yayasan Penelitian São Paulo (Brasil)	Pemerintah
83	FAPESPA: Yayasan Penelitian Pará (Brasil)	Pemerintah
84	Universitas Teknik Pertama, Ibadan (Nigeria)	Universitas
85	Universitas Florida Atlantic	Universitas
86	Universitas Negeri Florida	Universitas
87	Fondation Eboko	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
88	ForestGEO	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
89	ForestPlots.net	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
90	FRMi: Forest Resources Management, Inc.	Industri Swasta
91	FSC: Forest Stewardship Council	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
92	FUPRO: Organisasi nasional produsen kacang mete (Benin)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
93	GADD: Kelompok Pendukung Pembangunan Berkelanjutan (Kamerun)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
94	GATC: Aliansi Global Komunitas Teritorial	Multilateral
95	GCF-TF: Satuan Tugas Iklim dan Hutan Gubernur	Multilateral
96	GEO-TREES	Multilateral
97	GEOGLAM: Kelompok Pengamatan Bumi Inisiatif Pemantauan Pertanian Global	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
98	Geoindigena	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
99	Universitas George Mason	Universitas
100	Institut Teknologi Georgia	Universitas
101	GFZ-Potsdam: Pusat Penelitian Geosains Jerman	Universitas
102	Universitas Ghent (Belgia)	Universitas
103	GLP: Program Lahan Global	Masyarakat
104	Google	Industri Swasta
105	Guna	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
106	Universitas Harvard	Universitas
107	HMEI: Princeton High Meadows Environmental Institute	Universitas
108	Universitas Howard	Universitas
109	IBAY-SUP: Institut Tinggi Ilmu Lingkungan	Universitas
110	ICOS: Sistem Pengamatan Karbon Terpadu	Multilateral
111	IFA-Yangambi: L'Institut Facultaire des Sciences Agronomique de Yangambi	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
112	IIAP: Institut Penelitian Amazon Peru (Peru)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
113	IITA: Institut Internasional untuk Pertanian Tropis	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
114	ILAMB: International Land Model Benchmarking	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
115	INDEFOR-AP: Instituto Nacional de Desarrollo Forestal y Manejo del Sistema de Áreas Protegidas, Guinea Khatulistiwa	Pemerintah
116	Pusat Nasional Ilmu Biologi India	Pemerintah
117	INPA: Institut Nasional Penelitian Amazon (Brasil)	Pemerintah
118	INPE: Institut Nasional untuk Penelitian Antariksa (Brasil)	Pemerintah
119	INRAE: Institut Penelitian Nasional untuk Pertanian, Pangan dan Lingkungan (Prancis)	Pemerintah
120	INRS: Institut Penelitian Ilmiah Nasional (Kanada)	Universitas
121	Instituto Araguaia	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
122	Instituto Humboldt: Lembaga Penelitian Sumber Daya Hayati Alexander von Humboldt	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
123	IPAM: Institut Penelitian Lingkungan Amazon (Brasil)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
124	IPBES: Platform Kebijakan-Sains Antar Pemerintah tentang Keanekaragaman Hayati dan Jasa Ekosistem	Multilateral
125	IPCC (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE) Panel Antar Pemerintah untuk Perubahan Iklim	Multilateral
126	IRAD: Institut Penelitian Pertanian untuk Pembangunan (Kamerun)	Pemerintah
127	IRCCB: Pusat Referensi Internasional Chantal Biya (Kamerun)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
128	IRD: Institut Penelitian untuk Pengembangan (Prancis)	Pemerintah

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
129	IRIC: Institut des Relations Internationales du Cameroon	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
130	ISDR: Institut Tinggi Pembangunan Pedesaan M'Baïki (Republik Afrika Tengah)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
131	ISEA-Bengamisa: Institut Tinggi Studi Agronomi Bengamisa (Rep. Kongo)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
132	ISP-Gemena: Institut Pendidikan Tinggi Gemena (Perwakilan Republik Demokratik Kongo)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
133	ISTA: Institut Tinggi Teknik Terapan (Dem. Rep. Kongo)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
134	IUCN: Persatuan Internasional untuk Konservasi Alam	Multilateral
135	Universitas James Cook (Australia)	Universitas
136	Institut Teknologi Karlsruhe (Jerman)	Universitas
137	KU Leuven: Universitas Katolik Leuven (Belgia)	Universitas
138	Universitas Negeri Kwara (Nigeria)	Universitas
139	Labosystem s.r.l. (Italia)	Industri Swasta
140	LANL: Laboratorium Nasional Los Alamos	Pemerintah
141	LBNL: Lawrence Berkeley National Laboratory	Pemerintah
142	LCRP: Penyelamatan dan Perlindungan Simpanse Liberia (Liberia)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
143	Universitas Leiden (Belanda)	Universitas
144	Universitas Leipzig (Jerman)	Universitas
145	Universitas Lund (Swedia)	Universitas
146	Universitas Makerere (Uganda)	Universitas
147	Mancomunidata Regional Amazonica	pemerintah
148	MapBiomas (Brasil)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
149	Universitas Marien Ngouabi (Rep. Kongo)	Universitas
150	Universitas Marymount	Universitas
151	Institut Max Planck (Jerman)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
152	Universitas McGill (Kanada)	Universitas
153	Universitas Mendel	Universitas
154	Universitas Negeri Michigan	Universitas
155	MINRESI: Kementerian Riset dan Inovasi Ilmiah Kamerun	Pemerintah
156	MIT: Institut Teknologi Massachusetts	Universitas
157	Mora Institute (Meksiko)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
158	Universitas Negeri Morgan	Universitas
159	MoveBank	Multilateral
160	Universitas Negeri Murray	Universitas

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
161	Universitas Kerajaan Muteesa I (Uganda)	Universitas
162	Pusat Penelitian NASA Ames	Pemerintah
163	Aksi Bumi NASA	Pemerintah
164	Tim Ilmu Pengetahuan NASA ECOSTRESS	Multilateral
165	NASA GISS: Institut Goddard untuk Studi Luar Angkasa	Pemerintah
166	Tim Sains Investigasi Dinamika Ekosistem Global (GEDI) NASA	Multilateral
167	NASA GSFC: Pusat Penerbangan Luar Angkasa Goddard	Pemerintah
168	NASA Harvest	Multilateral
169	Inisiatif Masyarakat Adat NASA	Pemerintah
170	NASA JPL: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology	Universitas
171	NASA LRC: Pusat Penelitian Langley	Pemerintah
172	PUSAT PENERBANGAN ANTARIKSA MARSHALL (NASA MSFC): Pusat Penerbangan Luar Angkasa Marshall	Pemerintah
173	Tim Sains NASA Orbiting Carbon Observatory (OCO)	Multilateral
174	Tim Ilmuwan NASA Soil Moisture Active Passive (SMAP)	Multilateral
175	Tim Sains Biologi-Geologi Permukaan (SBG) NASA	Multilateral
176	Badan Nasional untuk Taman Nasional (Gabon)	Pemerintah
177	Universitas Agraria Nasional (Peru)	Universitas
178	Yayasan Nasional Masyarakat Adat (FUNAI)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
179	Sekolah Kehutanan Nasional (Kamerun)	Pemerintah
180	National Geographic Society	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
181	Universitas Nasional Taiwan (Taiwan)	Universitas
182	Universitas Nasional Guinea Khatulistiwa (Guinea Khatulistiwa)	Universitas
183	Universitas Nasional Santo Antonius Kepala Biara di Cuzco (Peru)	Universitas
184	Universitas Nasional Singapura (Singapura)	Universitas
185	Universitas Nasional Ucayali (Peru)	Universitas
186	Kolektif Teknologi Alam	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
187	NAU: Universitas Arizona Utara	Universitas
188	NCBS: Pusat Nasional untuk Ilmu Biologi (India)	Pemerintah
189	NCSU: Universitas Negeri Carolina Utara	Universitas
190	NEON: Jaringan Observatorium Ekologi Nasional AS	Pemerintah
191	Museum New Brunswick (Kanada)	Pemerintah
192	Universitas New York	Universitas
193	NICFI: Prakarsa Iklim dan Hutan Internasional Norwegia	Pemerintah
194	NIOO-KNAW: Institut Ekologi Belanda (Belanda)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
195	Laboratorium Pemantauan Global NOAA	Pemerintah
196	NSF: National Science Foundation	Pemerintah
197	Ahli Kelautan	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
198	Universitas Resmi Bukavu (Rep. Kongo)	Universitas
199	Universitas Negeri Ohio	Universitas
200	Cagar Alam Okapi (Dem. Rep. Kongo)	Pemerintah
201	Universitas Negeri Oklahoma	Universitas
202	Universitas Omar Bongo (Gabon)	Universitas
203	ONACC: Observatorium Nasional untuk Perubahan Iklim (Kamerun)	Pemerintah
204	Universitas Negeri Oregon	Universitas
205	ORNL: Laboratorium Nasional Oak Ridge	Pemerintah
206	OSFAC: Observatorium Satelit Hutan Afrika Tengah	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
207	Pemerintah Daerah Distrik Pakwach (Uganda)	Pemerintah
208	PAUWES: Institut Ilmu Air dan Energi Universitas Pan Afrika	Universitas
209	Universitas Negeri Penn	Universitas
210	Piriati Emberá	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
211	Planet	Industri Swasta
212	Hub Planet One-Mboa	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
213	PNNL: Laboratorium Nasional Pasifik Barat Laut	Pemerintah
214	Proforest (Inggris)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
215	PUCP: Universitas Katolik Kepausan Peru (Peru)	Universitas
216	Pueblo dari Jemez	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
217	R2FAC: Réseau de Recherche sur les Forêts d'Afrique Centrale	Multilateral
218	Koneksi Hutan Hujan	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
219	Rainbow Environment Consult (Kamerun)	Industri Swasta
220	Yayasan Hutan Hujan Norwegia	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
221	RAPEE: Jaringan Afrika untuk Promosi Pendidikan Lingkungan Hidup (Kamerun)	Pemerintah
222	Pemerintah Daerah Amazonas (Peru)	Pemerintah
223	Pemerintah Daerah Caqueta (Peru)	Pemerintah
224	Pemerintah Daerah Huanuco (Peru)	Pemerintah
225	Pemerintah Daerah Loreto (Peru)	Pemerintah
226	Pemerintah Daerah Madre de Dios (Peru)	Pemerintah
227	Pemerintah Daerah Piura (Peru)	Pemerintah
228	Pemerintah Daerah San Martin (Peru)	Pemerintah
229	Pemerintah Daerah Ucayali (Peru)	Pemerintah
230	REPALEAC: Jaringan Masyarakat Adat dan Lokal untuk Pengelolaan Ekosistem Hutan yang Berkelanjutan di Afrika Tengah	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
231	RIFFEAC: Réseau des Institutions de Formation Forestière et Environnementale de l'Afrique Centrale	Pemerintah
232	RIOFAC: Proyek Penegakan dan Pelembagaan OFAC	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
233	RRI: Prakarsa Hak dan Sumber Daya	Multilateral
234	Universitas Rutgers	Universitas
235	Universitas Negeri San Diego	Universitas
236	Universitas Negeri San Francisco	Universitas
237	Kecerdikan.	Industri Swasta
238	Ilmu Pengetahuan Schmidt	Donor
239	Science Systems and Applications Inc.	Industri Swasta
240	SERFOR: Organismo de Supervisión de los Recursos Forestales y de Fauna Silvestre, Peru	Pemerintah
241	SERNANP: Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado, Peru	Pemerintah
242	SERVIR	Multilateral
243	SGN: Senckenberg - Lembaga Penelitian Keanekaragaman Hayati dan Sistem Bumi Leibniz	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
244	SIG: Grup Informatika Spasial	Industri Swasta
245	SMACON: Organisasi Konservasi Mamalia Kecil	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
246	Smithsonian Institution	Pemerintah
247	Universitas Negeri South Dakota	Universitas
248	Institut Penelitian Barat Daya	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
249	Solusi Iklim Percikan	Industri Swasta
250	SPCB: Panel Ilmu Pengetahuan untuk Cekungan Kongo	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
251	SPUN: Masyarakat untuk Perlindungan Jaringan Bawah Tanah	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
252	STA: Aksi Tropis Berkelanjutan	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
253	Universitas Stanford	Universitas
254	STRl: Smithsonian Tropical Research Institute	Pemerintah
255	Pusat Penelitian Air Stroud	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
256	SURUDEV: Lari Berkelanjutan PBB untuk Pembangunan	Multilateral
257	Universitas Ilmu Pertanian Swedia, Uppsala	Universitas
258	Sylvera	Industri Swasta
259	TERRA: Pusat Pengajaran dan Penelitian (Belgia)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
260	Universitas Texas A&M	Universitas
261	Yayasan David dan Lucile Packard	Donor
262	Yayasan Gordon & Betty Moore	Donor

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
263	Universitas Nasional Kolombia (Kolombia)	Universitas
264	TINTA: The INvisible ThreAd	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
265	TotalEnergies (Uganda)	Industri Swasta
266	Universitas Tulane	Universitas
267	UAB: Universitas Otonom Barcelona (Spanyol)	Universitas
268	UAC: Universitas Abomey-Calavi (Benin)	Universitas
269	UB: Universitas Burundi (Burundi)	Universitas
270	UCC: Universitas Katolik Kongo	Universitas
271	UCL: University College London	Universitas
272	Universitas Katolik Louvain: Universitas Katolik Louvain (Belgia)	Universitas
273	UEA: Universitas Negeri Amazonas (Brasil)	Universitas
274	UFC Universitas Federal Ceará (Brasil)	Universitas
275	UFRJ: Universitas Federal Rio de Janeiro (Brasil)	Universitas
276	UFSC: Universitas Federal Santa Catarina (Brasil)	Universitas
277	UFSM: Universitas Federal Santa Maria (Brasil)	Universitas
278	UFVJM: Universitas Federal Vales do Jequitinhonha e Mucuri (Brasil)	Universitas
279	Pusat Ekologi & Hidrologi Inggris (Inggris)	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
280	UK FCDO: Kantor Luar Negeri, Persemakmuran & Pembangunan	Pemerintah
281	NERC Inggris: Dewan Riset Lingkungan Alam	Pemerintah
282	UL: Universitas Lorraine (Prancis)	Universitas
283	ULB: Universitas Bebas Brussel (Belgia)	Universitas
284	ULiège: Universitas Liège (Belgia)	Universitas
285	UMR EcoFoG: Ekologi Hutan Guyana Prancis (Prancis)	Multilateral
286	UN FAO: Organisasi Pangan dan Pertanian Perserikatan Bangsa-Bangsa	Multilateral
287	UN SDSN: Jaringan Solusi Pembangunan Berkelanjutan Perserikatan Bangsa-Bangsa	Multilateral
288	UN-SDSN: Jaringan Solusi Pembangunan Berkelanjutan Perserikatan Bangsa-Bangsa	Multilateral
289	UNA: Universitas Pertanian Nasional (Benin)	Universitas
290	UNAM: Universitas Otonomi Nasional Meksiko (Meksiko)	Universitas
291	UNAMAD: Universitas Nasional Amazon Madre de Dios (Peru)	Universitas
292	UNAP: Universitas Nasional Amazon Peru (Peru)	Universitas
293	UNB: Universitas Brasilia (Brasil)	Universitas
294	UNEP: Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa	Multilateral
295	UNESCO Organisasi Pendidikan, Keilmuan, dan Kebudayaan Perserikatan Bangsa-Bangsa	Multilateral
296	UNGE: Universitas Nasional Guinea Khatulistiwa (Guinea Khatulistiwa)	Universitas
297	UNIKIN: Universitas Kinshasa (Republik Demokratik Kongo)	Universitas
298	UNIKIS: Universitas Kisangani (Republik Demokratik Kongo)	Universitas
299	Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines Laboratorium Ilmu Iklim dan Lingkungan	Universitas
300	Universitas di Buffalo	Universitas
301	Universitas Aberdeen (Inggris)	Universitas
302	Universitas Alabama Huntsville	Universitas
303	Universitas Alberta	Universitas
304	Universitas Arizona	Universitas

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
305	Universitas Arkansas	Universitas
306	Universitas Bamenda, Kamerun	Universitas
307	Universitas Bangui	Universitas
308	Universitas Bern	Universitas
309	Universitas Bordeaux	Universitas
310	Universitas Buea, Kamerun	Universitas
311	Universitas California, Berkeley	Universitas
312	Universitas California, Davis	Universitas
313	Universitas California, Irvine	Universitas
314	Universitas California, Los Angeles	Universitas
315	Universitas California, Merced	Universitas
316	Universitas California, Santa Barbara	Universitas
317	Universitas California, Santa Cruz	Universitas
318	Universitas Campinas	Universitas
319	Universitas Cape Town	Universitas
320	Universitas Charleston	Universitas
321	Universitas Colorado Boulder	Universitas
322	Universitas Kopenhagen	Universitas
323	Universitas Delaware	Universitas
324	Universitas Delhi (India)	Universitas
325	Universitas Douala (Kamerun)	Universitas
326	Universitas Dschang (Kamerun)	Universitas
327	Universitas Edinburgh (Inggris)	Universitas
328	Universitas Energi dan Sumber Daya Alam (Ghana)	Universitas
329	Universitas Exeter (Inggris)	Universitas
330	Universitas Florida	Universitas
331	Universitas Georgia	Universitas
332	Universitas Hong Kong (Tiongkok)	Universitas
333	Universitas Ibadan (Nigeria)	Universitas
334	Universitas Idaho	Universitas
335	University of Illinois Urbana-Champaign	Universitas
336	Universitas Jambi (Indonesia)	Universitas
337	Universitas Kindu (Rep. Kongo)	Universitas
338	Universitas Leeds (Inggris)	Universitas
339	Universitas Maroua (Kamerun)	Universitas
340	Universitas Maryland	Universitas
341	Universitas Miami	Universitas
342	Universitas Michigan	Universitas
343	Universitas Minnesota	Universitas
344	Universitas Montana	Universitas
345	Universitas New Hampshire	Universitas
346	Universitas New Orleans	Universitas
347	Universitas Ngaoundéré (Kamerun)	Universitas
348	Universitas North Carolina di Chapel Hill	Universitas
349	Universitas Notre Dame	Universitas

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
350	Universitas Oklahoma	Universitas
351	Universitas Oxford	Universitas
352	Universitas Pretoria (Afrika Selatan)	Universitas
353	Universitas Puerto Rico - Rio Piedras	Universitas
354	Universitas Rwanda (Rwanda)	Universitas
355	Universitas Sains dan Teknologi Masuku (Gabon)	Universitas
356	Universitas California Selatan	Universitas
357	Universitas Rosario (Kolombia)	Universitas
358	Universitas Tokyo (Jepang)	Universitas
359	Universitas Tolima (Kolombia)	Universitas
360	Universitas Utah	Universitas
361	Universitas Vermont	Universitas
362	Universitas Victoria (Kanada)	Universitas
363	Universitas Virginia	Universitas
364	Universitas Washington	Universitas
365	Universitas Wisconsin	Universitas
366	Universitas Yaoundé I (Kamerun)	Universitas
367	UNP: Universitas Nasional Piura (Peru)	Universitas
368	UNTRM: Universitas Nasional Toribio Rodríguez de Mendoza (Peru)	Universitas
369	Kedutaan Besar Amerika Serikat Kamerun	Pemerintah
370	Pusat Gas Rumah Kaca (GRK) AS	Pemerintah
371	Laboratorium Penelitian Angkatan Laut AS	Pemerintah
372	Departemen Luar Negeri AS	Pemerintah
373	USAID: Badan Pembangunan Internasional Amerika Serikat	Pemerintah
374	DEPARTEMEN PERTANIAN AMERIKA SERIKAT (USDA): Departemen Pertanian AS	Pemerintah
375	USFS-IP: Program Internasional Dinas Kehutanan AS	Pemerintah
376	SURVEI GEOLOGI AMERIKA SERIKAT (USGS): Survei Geologi AS	Pemerintah
377	USP Universitas São Paulo (Brasil)	Universitas
378	USTM: Institut National Supérieur d'Agronomie et de Biotechnologie	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
379	UTEC: Universitas Teknik dan Teknologi (Peru)	Universitas
380	Universitas Utrecht (Belanda)	Universitas
381	UTRGV: Universitas Texas Rio Grande Valley	Universitas
382	UZH: Universitas Zurich (Swiss)	Universitas
383	Universitas Wageningen (Belanda)	Universitas
384	Universitas Wake Forest	Universitas
385	Universitas Washington	Universitas
386	WCS: Masyarakat Konservasi Satwa Liar	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL
387	Universitas Virginia Barat	Universitas
388	Universitas Wilkes	Universitas
389	Akal: University of The Witwatersrand, Johannesburg (Afrika Selatan)	Universitas
390	Pusat Penelitian Iklim Woodwell	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIL

#	ORGANISASI/LEMBAGA	JENIS
391	Bank Dunia	Multilateral
392	Wounaan	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIIL
393	WRI: World Resources Institute	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIIL
394	WWF: World Wild Fund for Nature	ORGANISASI MASYARAKAT SIPIIL
395	Akademi Alam Wyss	Universitas
396	Universitas Yale	Universitas

## D. Kegiatan Penelitian dan Pemantauan yang Direncanakan dan Sedang Berlangsung

**Tabel D-1.** Proyek dan program penelitian dan pemantauan yang direncanakan dan sedang berlangsung di daerah tropis yang dapat berkontribusi pada PANGEA.

CATATAN: Ini bukan daftar yang lengkap. A: Proyek atau program penilaian. E: Pendidikan. L: Program atau proyek jangka panjang dan berkelanjutan yang kemungkinan besar akan berlanjut selama PANGEA. M: Proyek atau program pemantauan. R: Proyek atau program penelitian. T: Tentatif, belum dikonfirmasi.

PROYEK/PROGRAM	SPONSOR UTAMA	NEGARA/NEGARA BAGIAN/WILAYAH	CAKUPAN GEOGRAFIS/BENUA	JENIS PROYEK/PROGRAM	TAHUN
1000 LANSKAP UNTUK 1 MILIAR ORANG	Filantropi	Kolombia, Ekuador, Fiji, Guyana, Kenya, Indonesia, Meksiko, Namibia, Nikaragua, Peru, Afrika Selatan	Global	L	2019-Sedang Berlangsung
2NDFOR	Bervariasi	25 negara	Pantropis	M, L	1990-Sekarang
AFR100: INISIATIF RESTORASI LANSKAP HUTAN AFRIKA	Badan Pembangunan Uni Afrika (AUDA)-NEPAD	Afrika	Afrika	L	2015-Sedang Berlangsung
AFRISAR I	ESA, NASA	Gabon	Afrika	R	2016
AFRISAR II	ESA, NASA	Gabon, Ghana, Kamerun, Republik Demokratik Kongo, Sao Tome dan Principe	Afrika	R	2023-2024
ALIVE (PENCITRAAN LANGSUNG PENCITRAAN DASAR LANJUTAN DARI EKOSISTEM BERVEGETASI)	NSF	Amerika Latin	Amerika	R	2024-Berkelanjutan
KAMPANYE AMAZON ESA-INPE	ESA, INPE	Brasil	Amerika	R	2024-2026
AMAZON VS KONGO: MEMAHAMI PERBEDAAN RESPONS HUTAN HUJAN TROPIS ANTAR BENUA TERHADAP VARIABILITAS IKLIM	Departemen Energi AS (DOE)	Amazon, Kongo	Afrika, Amerika	R	2024-2027
AMERIFLUX	US DOE	Amerika Utara dan Selatan	Amerika	M, L	1996-Sekarang
AMIT (INSTITUT TEKNOLOGI AMAZON)	Moore Foundation, GCF, USAID	Amazon	Amerika	L	2020-Sedang Berlangsung
AMMI (AFRICAN MASTERS OF MACHINE INTELLIGENCE)	Facebook, Google	Kamerun, Ghana Rwanda, Senegal, Afrika Selatan	Afrika	L	2003-Sekarang
ANDESFLUX	Administrasi Kelautan dan Atmosfer Nasional (NOAA)	Amazon	Amerika	L	2022-Berkelanjutan

PROYEK/PROGRAM	SPONSOR UTAMA	NEGARA/NEGARA BAGIAN/WILAYAH	CAKUPAN GEOGRAFIS/BENUA	JENIS PROYEK/PROGRAM	TAHUN
ANDEX	Program Penelitian Iklim Dunia	Peru	Amerika	R	2018-2025
ASCEND (MEMAJUKAN BIOLOGI SPEKTRAL DALAM PERUBAHAN LINGKUNGAN UNTUK MEMAHAMI KEANEKARAGAMAN)	NASA, NSF	Global	Global	R	2020-2025
ASIA-AQ (INVESTIGASI UDARA DAN SATELIT KUALITAS UDARA ASIA)	NASA	Filipina, Korea Selatan, Taiwan, Thailand	Asia	R	2024
ASIAFLUX	Bervariasi	Asia	Asia	L	1999-Sekarang
ATFS (ALIANSI UNTUK ILMU PENGETAHUAN HUTAN TROPIS)	NSF	Pantropis	Pantropis	R, L	2021-2025
ATTO (OBSERVATORIUM MENARA TINGGI AMAZON)	Max Planck, Pemerintah Jerman, dll.	Amazon	Amerika	L	2009-Sedang Berlangsung
AVUELO (AIRBORNE VALIDATION UNIFIED EXPERIMENT-LAND TO OCEAN)	NASA	Panama	Amerika	R	2025
LEBIH DARI SEKADAR MENGHITUNG POHON	WRI, Planet		Pantropis	R	2024-Berkelanjutan
BIODIVERSITAS-MISI ANTARIKSA BARU UNTUK MEMANTAU EKOSISTEM DALAM SKALA KECIL	ESA	Global	Global	T, L	TBD
BIOSCAPE (SURVEI KEANEKARAGAMAN HAYATI TANJUNG)	NASA, Pemerintah Afrika Selatan, UNESCO, dll.	Afrika Selatan	Afrika	R	2023-Sedang Berlangsung
KEANEKARAGAMAN KAKAO	Kementerian Pertanian Peru, USDA, Cocoa Seguro, USAID	Peru, Ekuador, Nikaragua, Honduras, El Salvador, Guatemala	Amerika	L	2021-Sedang Berlangsung
CALEDNA: PROGRAM DNA LINGKUNGAN KONSORSIUM KONSERVASI GENOMIK UNIVERSITAS CALIFORNIA	Institut Genomik UCSC, Kantor Presiden UC, HHMI, Jaringan Keanekaragaman Hayati Genom Global	California	Amerika	R	2017-Sedang Berlangsung
KARBON-I	NASA	Global	Global	T	TBD
CARPE (PROGRAM REGIONAL AFRIKA TENGAH UNTUK LINGKUNGAN HIDUP)	USAID		Afrika	L	1995-Sekarang
JARINGAN PLOT AFRIKA TENGAH	IRD	Kamerun, Gabon, dan Republik Demokratik Kongo	Afrika	R, L	2010-Sedang Berlangsung

PROYEK/PROGRAM	SPONSOR UTAMA	NEGARA/NEGARA BAGIAN/WILAYAH	CAKUPAN GEOGRAFIS/BENUA	JENIS PROYEK/PROGRAM	TAHUN
CLIMA (ALIANSI PEMODELAN IKLIM)	Ilmu Pengetahuan Schmidt	AMERIKA SERIKAT	Global	R	2018-Sedang Berlangsung
CoForFUNC (KOMPOSISI FUNGSIONAL HUTAN LEMBAH KONGO)	BiodivERsA, Komisi Eropa	Kamerun, Republik Kongo, Republik Demokratik Kongo	Afrika	R	2023-Sedang Berlangsung
KOLOMBIA BON (JARINGAN OBSERVASI KEANEKARAGAMAN HAYATI)	GIZ	Kolombia	Amerika	M, L	2015-Sedang Berlangsung
INSTITUT BASIN KONGO	NASA, NSF, Filantropi	Kamerun, Republik Demokratik Kongo, Gabon	Afrika	R, L	2015-Sedang Berlangsung
INSTITUT BASIN KONGO UNTUK EKONOMI IKLIM BARU	Amerika Serikat, Prancis, Jerman, Bezos Earth Fund, dll.	Kamerun	Afrika	L	2023-Sedang Berlangsung
PRAKARSA ILMU PENGETAHUAN CEKUNGAN KONGO	Filantropi	Republik Demokratik Kongo, Gabon, Kamerun, dan Republik Kongo	Afrika	L	2024-Berkelanjutan
CONGOFLUX	Uni Eropa	Republik Demokratik Kongo	Afrika	L	2021-Sedang Berlangsung
CONGOPEAT	UKRI NERC	Republik Demokratik Kongo, Republik Kongo	Afrika	R	2018-Sedang Berlangsung
PENGAMBILAN SAMPEL LIDAR NASIONAL REPUBLIK DEMOKRATIK KONGO	WWF	Republik Demokratik Kongo, Gabon, Kamerun, dan Republik Kongo	Afrika	R	2012
KEMBARAN DIGITAL SISTEM BUMI UNTUK KORIDOR KARBON DAN KEANEKARAGAMAN HAYATI AFRIKA TENGAH	NASA	Afrika Tengah	Afrika	R	2025-2027
ED2: KOMUNITAS PEMODELAN DEMOGRAFI EKOSISTEM	Bervariasi	Global	Global	R	2001-Sekarang
EDGE	NASA	Global	Global	T	TBD
PROYEK MENDENGARKAN GAJAH	Cornell	Afrika Tengah dan Timur	Afrika	L	1999-Sekarang
PENDANAAN HORIZON UNI EROPA (MISALNYA CONCERTO)	UNI EROPA	Global	Global	R	2021-2027
FLUXNET	NASA, DOE, NSF	Global	Pantropis	R, L	1997-Sekarang

PROYEK/PROGRAM	SPONSOR UTAMA	NEGARA/NEGARA BAGIAN/WILAYAH	CAKUPAN GEOGRAFIS/BENUA	JENIS PROYEK/PROGRAM	TAHUN
FORESTGEO	Smithsonian, Bervariasi	Global	Pantropis	R, L	1980-Sekarang
FORESTPLOTS.NET	ERC, NERC, Filantropi	Pantropis	Pantropis	R, L	2009-Sedang Berlangsung
GCF-TF (SATUAN TUGAS IKLIM DAN HUTAN GUBERNUR)	Filantropi	Bolivia, Brasil, Kolombia, Pantai Gading, Ekuador, Indonesia, Meksiko, Nigeria, Peru, Spanyol, A.S.	Pantropis	L	2008-Sedang Berlangsung
GATC: ALIANSI GLOBAL GERAKAN PEREMPUAN KOMUNITAS TERITORIAL PELATIHAN & PEMANTAUAN DRONE	Filantropi	Pantropis	Pantropis	R, L	2014-Sedang Berlangsung
KAMPANYE UDARA GEDI-SE ASIA	NASA	Asia Tenggara	Asia	R	2025
GEM	OTB	Pantropis	Pantropis	R, L	2013-Sedang Berlangsung
GEO-TREES	Filantropi	Global	Pantropis	R, L	2024
GEONEX	NASA, NOAA	Global	Global	M, R	2019-Sedang Berlangsung
GFW: GLOBAL FOREST WATCH	Institut Sumber Daya Dunia	Pantropis	Pantropis	L	2014-Sedang Berlangsung
STUDI MORTALITAS POHON BESAR GIGANTE-PANTROPIS	NSF	Brasil, Kamerun, Malaysia, Panama	Pantropis	R	2023-Sedang Berlangsung
GLAD: ANALISIS DAN PENEMUAN LAHAN GLOBAL	NASA, Google, USDA, USGS	Global	Global	R, L	2013-Sedang Berlangsung
ATLAS EKOSISTEM GLOBAL	Kelompok Pengamatan Bumi (GEO)	Global	Global	L	2024-Berkelanjutan
GLOBE PEMBELAJARAN DAN PENGAMATAN GLOBAL UNTUK MEMBERI MANFAAT BAGI LINGKUNGAN	NASA, NSF, NOAA, Departemen Luar Negeri AS	Global	Global	L	1994-Sekarang
GOFC-GOLD (PENGAMATAN GLOBAL TERHADAP TUTUPAN HUTAN DAN DINAMIKA PENGGUNAAN LAHAN)	NASA, ESA	Global	Global	L	1997-Sekarang
GRUAN	Program Penelitian Iklim Dunia (RCRP), UNFCCC	Afrika, Amerika	Afrika, Amerika	L	2008-Sedang Berlangsung

PROYEK/PROGRAM	SPONSOR UTAMA	NEGARA/NEGARA BAGIAN/WILAYAH	CAKUPAN GEOGRAFIS/BENUA	JENIS PROYEK/PROGRAM	TAHUN
GUYAFLUX	INRAE	Prancis (Guyana Prancis)	Amerika	L	2003-Sekarang
GUYAFOR	CIRAD, ONF, CNRS	Prancis (Guyana Prancis)	Amerika	L	2000-Sedang Berlangsung
KADI	Uni Eropa	Afrika	Afrika	R	2023-Sedang Berlangsung
LABORATORIUM TANAH & KARBON	World Resources Institute, Filantropi	Pantropis	Pantropis	M	2021-Sedang Berlangsung
INISIATIF KEBERLANJUTAN AMERIKA LATIN / PERU HUB	USAID	Peru	Amerika	L	2019-Sedang Berlangsung
LBA (FASE 1, 2, 3)	MCTI Brasil, NASA	Amazon	Amerika	L	1998-Sekarang
MAPBIOMAS	Filantropi	Amazon, Indonesia	Amerika, Asia, rencana ekspansi ke Afrika	R, L	2017-Sedang Berlangsung
NASA HARVEST	NASA	Global	Global	L	2017-Sedang Berlangsung
NGEE-TROPIS	DOE	AMERIKA SERIKAT	Pantropis	R	2015-2028
MOSAIK PLANET NICFI	NICFI	Pantropis	Pantropis	R	2020-2025
OFVI (INISIATIF SATU VISI HUTAN)	Kementerian Pendidikan Tinggi dan Riset Prancis (MESR), Kementerian Prancis untuk Eropa dan Luar Negeri (MEAE)	Republik Demokratik Kongo, Gabon, Republik Kongo	Afrika	R, L	2023-Sedang Berlangsung
PECAN	NSF, NASA, DOE	Global	Global	R, L	2011-Sedang Berlangsung
PLANET Tanager	Planet	Global	Global	R, L	2024-Berkelanjutan
PROGRAM PPG-CLIAMB	UEA, INPA	Brasil	Amerika	R, L	2009-Sedang Berlangsung
PROYEK CENTINELA	Planet	Bolivia, Brasil, Kosta Rika, Republik Demokratik Kongo, Indonesia	Pantropis	R	2024-Berkelanjutan

PROYEK/PROGRAM	SPONSOR UTAMA	NEGARA/NEGARA BAGIAN/WILAYAH	CAKUPAN GEOGRAFIS/BENUA	JENIS PROYEK/PROGRAM	TAHUN
<b>R2FAC (JARINGAN PENELITIAN HUTAN AFRIKA TENGAH)</b>	Multi-Institusi	Kamerun, Republik Afrika Tengah, Gabon, Republik Kongo, Republik Demokratik Kongo, Belgia, Prancis	Afrika	L	2012-Sedang Berlangsung
<b>REKAPITULASI2</b>	Badan Antariksa Eropa, Proyek Koordinasi Karbon Internasional, proyek Uni Eropa	Global	Global	R, M	2017-2023
<b>RESSAC</b>	Uni Eropa	Angola, Burundi, Kamerun, Republik Afrika Tengah, Chad, Guinea Khatulistiwa, Republik Demokratik Kongo, Gabon, Republik Kongo, Rwanda, Sao Tome & Principe	Afrika	L	2024-Berkelanjutan
<b>BIDANG FOKUS ILMU PENGETAHUAN RUBISCO</b>	DOE	Global	Pantropis	L	2011-Sedang Berlangsung
<b>POHON RWANDA</b>	Dewan Riset Swedia	Rwanda	Afrika	R, L	2021-Sedang Berlangsung
<b>SARI (PRAKARSA PENELITIAN ASIA SELATAN/TENGGERA)</b>	NASA LCLUC	Asia Selatan dan Asia Tenggara	Asia	R, L	2013-Sedang Berlangsung
<b>PANEL SAINS UNTUK AMAZON</b>	SDSN PBB	Kolombia, Bolivia, Ekuador, Peru, Suriname, Guyana, Guyana, Guyana, Brasil, dan Venezuela	Amerika	L	2020-Sedang Berlangsung
<b>PANEL SAINS UNTUK KONGO</b>	SDSN PBB	Kamerun, Republik Afrika Tengah, Gabon, Republik Demokratik Kongo, Republik Kongo, Guinea Khatulistiwa	Afrika	L	2023-Sedang Berlangsung
<b>SE.PLAN</b>	FAO	Pantropis	Pantropis	M, L	2016-Sedang Berlangsung
<b>SELPER: MASYARAKAT AMERIKA LATIN UNTUK PENGINDERAAN JAUH DAN SISTEM INFORMASI ANTARIKSA</b>	Bervariasi	Amerika Latin	Amerika	L	1980-Sekarang
<b>KEGIATAN SERVIR HUB</b>	NASA, USAID	Amazonia, Amerika Tengah, Afrika Timur dan Selatan, Hindu Kush Himalaya, Asia Tenggara, Afrika Barat	Afrika, Amerika, Asia	L	2004-Sekarang

PROYEK/PROGRAM	SPONSOR UTAMA	NEGARA/NEGARA BAGIAN/WILAYAH	CAKUPAN GEOGRAFIS/BENUA	JENIS PROYEK/PROGRAM	TAHUN
<b>SILK (SEKOLAH UNTUK PENGETAHUAN ADAT DAN LOKAL)</b>	Institut Basin Kongo	Kamerun	Afrika	R, L	2018-Sedang Berlangsung
<b>SILVACARBON</b>	USGS	Pantropis	Pantropis	L	2011-Sedang Berlangsung
<b>SMAP CAL/VAL DI ASIA TENGGARA</b>	NASA	Malaysia	Asia	R	2024-Berkelanjutan
<b>LANSKAP BERKELANJUTAN BRASIL</b>	USFS, USAID, DOS, Embrapa	Brasil, Peru	Amerika	R	2008-2023
<b>SWAMP (PROGRAM ADAPTASI DAN MITIGASI LAHAN BASAH BERKELANJUTAN)</b>	USAID, NICFI, Norad, IKI, Filantropi	Asia-Pasifik, Afrika, Amerika Latin, dan Karibia	Pantropis	R, L	2008-Sedang Berlangsung
<b>TALLO (BASIS DATA ALOMETRI POHON DAN ARSITEKTUR TAJUK GLOBAL)</b>	UKRI NERC	Global	Global	L	2022-Berkelanjutan
<b>TERN (JARINGAN PENELITIAN EKOSISTEM TERESTRIAL AUSTRALIA)</b>	Pemerintah Australia	Australia	Australia	R, L	2009-Sedang Berlangsung
<b>TERRABIO</b>	USAID, Aliansi Keanekaragaman Hayati Internasional/CIAT, sektor swasta	Amazon	Amerika	M	2023-2034
<b>TERRA-I</b>	Aliansi Keanekaragaman Hayati & CIAT, The Nature Conservancy	Amerika Latin	Amerika	M	2023-Sedang Berlangsung
<b>TMFO</b>	Cirad, CGIAR, FTA, ESA, Pemerintah Prancis	Pantropis	Pantropis	L	2017-Sedang Berlangsung
<b>TROPICAL FLUXNET-CH<sub>4</sub></b>	Moore Foundation, NSF	Amazon, Asia Tenggara, Botswana	Afrika, Amerika, Asia	R	2021-Sedang Berlangsung
<b>JARINGAN FLUKS AFRIKA BARAT</b>	AMMA-CATCH Benin, FairCarboN	Benin	Afrika	R, L	1997-Sekarang

## E. Tabel Pengukuran PANGEA Terperinci

**Tabel E-1.** Deskripsi variabel ekologi dan geofisika yang relevan dengan kampanye ini, dengan persyaratan pengamatan yang sesuai dan aset Observasi Bumi yang ada atau yang akan datang. ET: evapotranspirasi; LST: suhu permukaan tanah; SIF: fluoresensi yang diinduksi oleh matahari. **Teks berwarna ungu** menunjukkan satelit dari lembaga federal non-AS. \*Menunjukkan misi yang belum diluncurkan dan/atau mungkin masih dalam pertimbangan kompetitif. \*\* Menunjukkan misi yang baru saja berakhir.

VARIABEL(-VARIABEL)	PERTANYAAN SAINS	PENGUKURAN TANAH	MENGAMATI TEKNOLOGI	ASET PENGAMATAN BUMI	
				SATELIT ( DIRENCANAKAN/DIUSULKAN)	UDARA ( DRONE/PESAWAT TERBANG)
GPP	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q26	Menara fluks, spektrum tingkat daun	Spektroskopi Inframerah	OCO-2/3, <b>TROPOMI</b> , GOES-R ABI, AHI, MTG-I, NASA GHG ESE*, <b>Sentinel 5P/5*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CO2M*</b> , GOSAT-2, GOSAT-GW*	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
ET	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13-Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q24-Q26	Menara fluks	Termal	Landsat, ECOSTRESS, SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>TRISHNA*</b> , <b>LSTM*</b> , VIIRS, <b>Sentinel-3</b> , <b>Komersial*</b> , satelit cuaca GEO	NASA HyTES, MASTER
RESPIRASI EKOSISTEM	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q13, Q15, Q17, Q18, Q20, Q22, Q26	Menara fluks	Spektroskopi Inframerah	GOES-R ABI, AHI, MTG-I	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
CO <sub>2</sub> & CH <sub>4</sub> FLUKS	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q18, Q20, Q22, Q26	Menara fluks, pengukuran ruang	Hiperspektral	EMIT, <b>MethaneSat</b> , SBG*, Carbon- i*, CarbonMapper*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, NEON AOP, GAO
			Kovarians Eddy Udara (AEC)		NASA CARAFE

VARIABEL(-VARIABEL)	PERTANYAAN SAINS	PENGUKURAN TANAH	MENGAMATI TEKNOLOGI	ASET PENGAMATAN BUMI	
				SATELIT ( DIRENCANAKAN/DIUSULKAN)	UDARA ( DRONE/PESAWAT TERBANG)
KOLOM CO /CH /CO <sub>24</sub>	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q14, Q18, Q20, Q22, Q26	Spektrometer TCCON, COCCON, EM27/SUN	Spektroskopi Inframerah	OCO-2/3, NASA GHG ESE*, Sentinel- 5P/5*, FLEX*, CO2M*, GOSAT-2, GOSAT-GW*	NASA CFIS (SIF), DLR CoMet (CO /CH ) <sub>24</sub>
BIOMASSA DI ATAS PERMUKAAN TANAH	Q1, Q2, Q4-Q8, Q10, Q11, Q13, Q15, Q18, Q20, Q22	Data plot inventarisasi hutan, pemindaian laser terestrial	Lidar	GEDI, ICESat-2, MOLI*, EDGE*	NASA LVIS, lidar jejak kaki kecil (drone dan pesawat)
			Radar	Sentinel-1, NISAR*, BIOMASSA*	NASA UAVSAR
KEMATIAN POHON	Q9, Q11-Q13, Q15, Q17-Q22, Q25, Q27	Mengulang data plot inventarisasi hutan sensus	Lidar, Radar, Multispektral	Landsat, Sentinel-1/2, Planet, GEDI, NISAR*, BIOMASSA*, EDGE*	Ulangi RGB drone atau lidar
TINGGI KANOPI	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q17-Q22, Q27	Pemindaian laser terestrial	Lidar	GEDI, ICESat-2, MOLI*, EDGE*	NASA LVIS, lidar jejak kaki kecil (drone dan pesawat)
HETEROGENITAS KETINGGIAN VERTIKAL			Radar	NISAR*, Sentinel-1, BIOMASS*	NASA UAVSAR
DINAMIKA CELAH KANOPI					
KERAGAMAN SPEKTRAL	Q5, Q10-Q12, Q15, Q18, Q21, Q27	Spektrum tingkat daun	Hiperspektral	EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, Planet's Tanager, SBG*, CHIME*, FLEX*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO
KERAGAMAN FUNGSIONAL	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q18, Q21, Q22, Q27	Keanekaragaman taksonomi tanaman; sifat-sifat tanaman; IEK, TEK, LEK			
SIFAT-SIFAT DAUN TAJUK: LMA, N, P, CA, K, PIGMEN	Q5-Q7, Q10-Q13, Q15, Q18, Q21, Q22	Keanekaragaman taksonomi tanaman; ciri-ciri fungsional tanaman			
KEANEKARAGAMAN FAUNA: KEBERADAAN/KELIMPAHAN, KELIMPAHAN, PERGERAKAN, INTERAKSI SPESIES	Q5, Q10-Q12, Q18, Q27	Perangkap kamera; sensor bioakustik; pelacakan pergerakan hewan; eDNA; IEK, TEK, LEK; inventarisasi spesies tanaman	Hiperspektral, Lidar, Radar	EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, Planet's Tanager, SBG*, CHIME*, NISAR*, BIOMASS*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar tapak kecil
FENOLOGI	Q2, Q4, Q11-Q15, Q18, Q22, Q27	Fenokam, Pengamatan fenologi jangka panjang berbasis lapangan; IEK, TEK, LEK	Radiometer Optik (OR) dan Hiperspektral	Landsat, Sentinel-2, Planet, OLCI, EMIT, PACE, PRISMA, EnMAP, SBG*, CHIME*, FLEX*	Ulangi RGB drone

VARIABEL(-VARIABEL)	PERTANYAAN SAINS	PENGUKURAN TANAH	MENGAMATI TEKNOLOGI	ASET PENGAMATAN BUMI	
				SATELIT ( DIRENCANAKAN/DIUSULKAN)	UDARA ( DRONE/PESAWAT TERBANG)
<b>TEKANAN AIR:</b> KELEMBABAN TANAH	Q1-Q4, Q6-Q9, Q13-Q19, Q22, Q24, Q25	Probe kelembaban tanah	Radar/radiometri gelombang mikro	SMAP, <b>SMOS</b> , <b>Sentinel-1</b> , NISAR*, <b>BIOMASS*</b> , LSTM*,	NASA UAVSAR, AirMOSS
<b>STRES AIR:</b> KANDUNGAN AIR DAUN, SIFAT HIDROLIK DAUN/TANAMAN	Q2-Q4, Q6-Q9, Q12-Q19, Q22	Kandungan air daun, Potensi & konduktansi air daun/batang, VOD berbasis menara (L-band GNSS)	GNSS-R / Sinyal Peluang, Spektroskopi Pencitraan	AMSR-E, EMIT, SBG VSWIR & TIR*, <b>CHIME*</b> , <b>FLEX*</b> , SNOOPI*, CYGNSS, <b>Lemur-2</b>	NASA AVIRIS-NG/3 + HyTES, MASTER
<b>TEKANAN TERMAL:</b> T50, SUHU PERMUKAAN TANAH, EMISIVITAS	Q2-Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q15, Q19	Kamera FLIR	Termal	Landsat, ECOSTRESS, SBG*, <b>FLEX*</b> , <b>TRISHNA*</b> , LSTM*, Komersial*	NASA HyTES, MASTER
<b>KEBAKARAN AKTIF</b>	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q20, Q23, Q27	Kelembaban bahan bakar hidup, kelembaban tanah, luas area terbakar, tingkat keparahan luka bakar, IEK, TEK, LEK	Termal	Landsat, VIIRS, <b>Sentinel-3</b> , SBG*, <b>TRISHNA*</b> , LSTM*, Komersial*	NASA HyTES, MASTER
<b>AEROSOL PEMBAKARAN BIOMASSA</b>	Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12, Q13, Q19, Q20, Q27	Jenis bahan bakar, kepadatan bahan bakar, pengukuran aerosol	UV/Inframerah, Fotometer, Lidar	OMPS, VIIRS, EMIT, PACE, <b>OLCI</b> , NISAR*, <b>BIOMASS*</b> , CALIPSO-CALIOP**, AOS*	
<b>PENGUNAAN LAHAN DAN TUTUPAN LAHAN</b>	Q1, Q3, Q4, Q6, Q7, Q9, Q12-Q14, Q16, Q19-Q20, Q25, Q27	Kegiatan pertanian (jenis tanaman, hasil panen, rotasi), tingkat penebangan, praktik kebakaran, IEK, TEK, LEK, praktik manajemen konservasi	Radiometer Optik (OR), Hiperspektral, Lidar, Radar	Landsat, <b>Sentinel-2</b> , <b>Planet</b> , VIIRS, <b>OLCI</b> , EMIT, <b>PRISMA</b> , <b>EnMAP</b> , SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CarbonMapper*</b> , PACE*	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar tapak kecil
<b>PENYEDIAAN &amp; LAYANAN EKOSISTEM BUDAYA:</b> MAKANAN, AIR BERSIH, OBAT-OBATAN, PRAKTIK SPIRITUAL DAN UPACARA	Q27	Area panen dan hasil panen tanaman dan HHBK, identifikasi jenis hutan yang penting secara budaya dan spiritual, kuantitas dan kualitas air	Radiometer Optik (OR), Hiperspektral, Lidar, Radar	Landsat, <b>Sentinel-1/2</b> , <b>Planet</b> , VIIRS, <b>OLCI</b> , EMIT, PACE, <b>PRISMA</b> , <b>EnMAP</b> , SWOT, SMAP, <b>SMOS</b> , GRACE-FO, SBG*, <b>CHIME*</b> , <b>FLEX*</b> , <b>CarbonMapper*</b>	NASA AVIRIS-NG/3, UZH ARES, GAO, NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar tapak kecil
<b>AIR PERMUKAAN:</b> KUANTITAS, ALIRAN (DEBIT), GENANGAN	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q24, Q25, Q27	Ketinggian permukaan air, tingkat genangan, karakterisasi debit	Altimeter, Radar, Radiometer	SWOT, <b>Sentinel-1</b> , NISAR*, BIOMASSA*	NASA UAVSAR
<b>PENYIMPANAN AIR TANAH &amp; AIR TERESTRIAL</b>	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q16-Q19, Q24, Q25, Q27	Pengukuran sumur	Gravimetri	GRACE-FO, MC*	

VARIABEL(-VARIABEL)	PERTANYAAN SAINS	PENGUKURAN TANAH	MENGAMATI TEKNOLOGI	ASET PENGAMATAN BUMI	
				SATELIT ( DIRENCANAKAN/DIUSULKAN)	UDARA ( DRONE/PESAWAT TERBANG)
KELEMBABAN ATMOSFER, VPD	Q1-Q4, Q6-Q9, Q14, Q17, Q19, Q22, Q24, Q25, Q27	Stasiun cuaca	Gelombang mikro, penyuar inframerah, pencitra	ATMS, GeoXO*, AOS*	
ANGIN	Q1-Q4, Q6, Q7, Q9, Q14, Q17, Q19, Q22, Q24, Q25	Stasiun cuaca	Lidar angin Doppler	Aeolus	Pengukuran radiosonde
UNSUR HARA DAN TEKSTUR TANAH	Q21, Q22, Q24, Q25, Q27	Sampel tanah	Hiperspektral	MEMANCARKAN, KECEPATAN, SBG*, BERPADU*	NASA AVIRIS-NG/3
				Catatan: PANGEA akan mengeksplorasi hubungan korelasional dengan variabel yang diindera dari jarak jauh, bukan pengukuran langsung.	
TOPOGRAFI/ GEOMORFOLOGI	Q1, Q8, Q19, Q21, Q22, Q24, Q25, Q27		Lidar, Radar	SRTM, Copernicus GLO-30	NASA UAVSAR, NASA LVIS, lidar tapak kecil

## F. Tanggapan terhadap Umpan Balik

Kami berterima kasih atas umpan balik yang kami terima dalam tanggapan survei NASA CCE. Secara khusus, kami ingin mengucapkan terima kasih kepada Alejandro Cueva (El Colegio de la Frontera Sur, Unidad Villahermosa), Bruno Ubiali (Universitas Georgia), Christiane Nimpa (Universitas Bamenda), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Ing Forestal y del Medio Ambiente), Cyrille Bienvenu Bediang (Kementerian Pendidikan Menengah), Gerson Lopes (Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá), David Carchipulla-Morales (Wake Forest University), Cristhian Saldarroaga Sanchez (Gobierno Regional Piura, Peru), Diana Rocio Carvajal-Contreras (Universidad Externado), Jeff Atkins (USDA Forest Service, Southern Research Station), Joe Berry (Carnegie Institution for Science), Joost van Haren (University of Arizona, Biosphere 2), Kyle Dexter (University of Turin), Lorena Santamaria Rojas (Stanford University), Louis Defo (University of Yaoundé I, Proforest), Luciana Pires (World Environmental Conservancy), Luiz A. T. Machado (IFUSP), Maricar M Aguilos (North Carolina State University), Ossanatou Mamadou (Universite d'Abomey-Calavi), Paul Stoy (University of Wisconsin), Peke Koukou Leon Cest la Vie (Groupement Agropastoral pour le Developpement de Yongoro), Wu Sun (Carnegie Institution for Science), dan dua responden tanpa nama.

### Proses

Komentar terhadap draf Buku Putih PANGEA diminta oleh kantor Siklus Karbon dan Ekosistem NASA melalui survei berbasis web dengan 13 pertanyaan yang dikembangkan oleh Program Ekologi Terrestrial NASA. Komentar didasarkan pada draf Buku Putih yang dirilis untuk tinjauan publik pada bulan September 2024. Tanggapan terhadap survei tersebut disampaikan kepada pimpinan PANGEA secara berkala hingga November. Komentar dari survei tersebut digunakan secara ekstensif untuk memperbaiki Buku Putih final.

Kami menanggapi komentar-komentar tersebut dengan terlebih dahulu merangkum kekuatan-kekuatan utama dan area-area yang memerlukan perbaikan yang disoroti oleh para responden survei, yang dipilih oleh para penulis Buku Putih. Kami juga memberikan tanggapan poin demi poin terhadap komentar-komentar survei. Kami tidak mencatat komentar yang jawabannya hanya "ya" atau "tidak". Dalam beberapa kasus, seorang responden survei memberikan jawaban yang sama untuk lebih dari satu pertanyaan. Kami membalas komentar yang sama hanya satu kali.

Catatan tentang terjemahan: Sejumlah responden dalam survei ini menggunakan bahasa Prancis dan Spanyol. Kami mencatat komentar asli mereka dan memberikan [dalam tanda kurung] terjemahan kami.

### Kekuatan Utama PANGEA yang Disoroti oleh Responden Survei

Kutipan langsung dari responden survei:

- "PANGEA merupakan program penelitian yang sangat ambisius, namun dapat dicapai, yang akan menjawab salah satu tantangan terbesar yang kita hadapi saat ini, yaitu memahami pola dan proses serta heterogenitas yang mengatur hutan tropis di seluruh dunia."
- "Tema-tema ilmiahnya sangat komprehensif dan menyentuh aspek-aspek terpenting dari dinamika ekosistem tropis serta implikasi iklim dan sosial-ekologisnya. Kesenjangan

pengetahuan dan pertanyaan-pertanyaan diidentifikasi secara jelas dengan masukan dari masyarakat."

- "Upaya kolaboratif PANGEA", yang "merupakan inisiatif penting yang dapat mendukung strategi konservasi untuk planet ini dan juga akan mengintegrasikan para ilmuwan dari seluruh dunia dalam upaya bersama untuk melindungi keanekaragaman hayati."
- "Studi ini terorganisir dengan baik dan multidisiplin serta menangkap studi yang diperlukan untuk mengisi kesenjangan dalam ekosistem yang paling rentan secara global."
- "Struktur dan isi dari laporan studi pelingkupan PANGEA sangat jelas. Sebagai contoh, kami memahami dengan jelas bahwa PANGEA akan menjelaskan pola perubahan yang terjadi baru-baru ini (5-30 tahun) dan yang sedang berlangsung pada hutan tropis, bentang alam, dinamika dan umpan balik, serta variasi geografisnya, dengan pendekatan lingkungan. Penekanan diberikan pada perbandingan antara Amerika dan Afrika."
- "Ini benar-benar disesuaikan dengan kenyataan di lapangan"
- "Ini adalah integrasi dari berbagai bidang; ini adalah studi multidisiplin."
- "Pendekatan ini adalah apa yang kita butuhkan untuk lebih memahami dan meramalkan - mensimulasikan - bagaimana perubahan iklim dan penggunaan lahan akan berdampak pada iklim dan kehidupan."
- "Laporan ini komprehensif dan terorganisir dengan baik. Bagian pendahuluan dengan jelas menjelaskan mengapa kampanye ini penting dan tepat waktu. Kesenjangan pengetahuan dan pertanyaan-pertanyaan diartikulasikan dengan baik dan akan berfungsi sebagai peta jalan untuk penelitian di masa depan. Laporan ini juga mengidentifikasi misi satelit dan produk data yang sangat penting untuk menjawab pertanyaan penelitian kampanye PANGEA."
- "Saya menemukan bahwa fokus pada hutan Afrika sangat luar biasa; PANGEA akan membahas ketidakpastian yang sangat penting dari peran benua Afrika dalam sistem bumi tanpa mengesampingkan peran sentral yang dimainkan oleh hutan hujan Amazon."
- "Penyertaan fokus utama pada sistem tropis di Afrika adalah kekuatan utama"
- "Proses PANGEA tampaknya sangat disengaja dan disengaja untuk melibatkan masyarakat lokal, pemangku kepentingan, dan pemerintah jika diperlukan. Keterlibatan banyak komunitas dari daerah sasaran (Amerika Selatan dan Afrika Tengah) dan proses pelibatan yang disengaja menunjukkan hal tersebut. Juga jelas bahwa kepemimpinan PANGEA juga akan melibatkan komunitas lain -yang belum diidentifikasi- ketika inklusi mereka disarankan atau diperlukan untuk keberhasilan. "
- "Pendekatan terhadap keragaman dan inklusi sangat kuat."

Relevansi PANGEA dinilai tinggi oleh sebagian besar responden, termasuk dengan nilai "sangat baik", "sangat baik", dan "sangat relevan".

Hampir semua responden menganggap PANGEA layak, dengan satu tanggapan yang menangkap esensi dari jawaban-jawaban tersebut, "Saya merasa PANGEA sepenuhnya layak karena memperluas penelitian LBA yang sukses dan kolaborasi selama puluhan tahun dengan para peneliti tropis serta mengalihkan fokus pada hutan tropis Afrika yang kritis namun kurang dipahami dengan rencana pengamatan yang komprehensif." Sebaliknya, seorang responden lain menyampaikan pendapatnya:

"Implementasi akan membutuhkan banyak pekerjaan, tetapi tanpa rencana yang lebih rinci mengenai lokasi mana yang akan digunakan dan difokuskan, sulit untuk menilai kelayakannya secara penuh."

Kami sangat menghargai dan setuju dengan komentar-komentar yang menekankan pada pekerjaan penting yang akan dilakukan jika PANGEA terpilih. Sebagai contoh, "Ini adalah cakupan pekerjaan yang sangat besar yang akan mengandalkan bantuan dan pelaksanaan dari beberapa kelompok kerja serta penduduk asli daerah yang akan diteliti. Setelah membacanya dengan seksama, proyek ini tampak terikat dengan baik. Seiring dengan berkembangnya penelitian, perbaikan-perbaikan spesifik mungkin diperlukan, namun secara keseluruhan proposal ini terstruktur dengan sangat baik."

Selain umpan balik positif, ada beberapa kelemahan yang disampaikan, yang telah diupayakan oleh para penulis Buku Putih PANGEA untuk diatasi dalam dokumen akhir. Tanggapan kami terhadap tanggapan survei yang meminta kejelasan dan mengidentifikasi bidang-bidang yang perlu diperbaiki disusun secara tematis di bawah ini.

## **Bidang-bidang dalam Studi PANGEA yang Membutuhkan Perbaikan**

Kutipan dari komentar asli ditampilkan dalam jenis huruf biasa. [Tanggapan PANGEA berwarna biru.](#)

### **Keanekaragaman hayati:**

- "*Biodiversidad*" [Keanekaragaman Hayati]

[Bagian 2.2 dalam buku putih yang telah direvisi secara substansial memberikan perhatian pada tema-tema keanekaragaman hayati yang relevan dengan PANGEA. Banyak pertanyaan sains spesifik \(misalnya, Q5, Q6, dan Q7\) yang juga berfokus secara khusus pada pertanyaan keanekaragaman hayati.](#)

### **Jendela waktu yang singkat:**

- "Meskipun dampak perubahan iklim dan tindakan manusia dipertimbangkan, proyek ini memiliki jangka waktu yang sangat singkat. Anda tidak melihat kolaborasi ilmuwan lain seperti arkeolog. Keterbatasan dalam tidak mempertimbangkan referensi temporal yang dapat diberikan oleh arkeologi Afrika dan Amerika Latin dalam kaitannya dengan ekosistem terestrial"
- "Diperlukan pandangan jangka panjang yang disediakan oleh data paleoekologi dan informasi dari arkeologi Afrika dan Amerika Latin terkait hutan tropis."

[Rentang waktu proyek ini adalah masa lalu \(era satelit historis sekitar 50 tahun\) hingga akhir abad ini. Studi arkeologi dan paleontologi tidak diragukan lagi akan meningkatkan perspektif kami, tetapi sumber daya terbatas dalam proyek ini dan kami harus membuat keputusan praktis untuk menanggapi kriteria sponsor NASA kami.](#)

### **Proses kolaborasi dan pertukaran tidak jelas:**

- "Ini ditampilkan sebagai proyek kolaboratif antara para ilmuwan. Hal ini juga mencakup pengetahuan penduduk asli dan masyarakat adat setempat tentang ekosistem. Saya ragu apakah masyarakat lokal merupakan bagian dari tim kolaboratif atau hanya sebagai penerima hasil."

- "Memberdayakan masyarakat setempat untuk lebih terlibat langsung dan terlibat lebih dari sekadar pembantu dan pekerja upahan."
- "Tidak jelas bagi saya proses pengumpulan data dan hubungan antara ilmuwan di Amerika Serikat dengan masyarakat di Amerika Latin dan Afrika."

PANGEA telah melakukan upaya yang kuat sejak awal untuk melibatkan masyarakat lokal dan masyarakat adat, ilmuwan, staf pemerintah, dan banyak anggota masyarakat lainnya dari daerah tropis. Proses produksi bersama pengetahuan dimulai sejak pelingkupan PANGEA dan penulisan Buku Putih, yang telah dilakukan melalui kerja sama dengan para pemimpin Masyarakat Adat dari Aliansi Global Masyarakat Teritorial (GATC). Jika PANGEA terpilih, produksi bersama dengan Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal akan segera dimulai dan akan berkelanjutan. Pendekatan PANGEA terhadap ilmu pengetahuan yang berkeadilan, pengembangan kapasitas, dan pelatihan akan secara langsung berhadapan dengan isu kampanye flyover dan ilmu pengetahuan parasut. Berdasarkan keberhasilan dari LBA, kami percaya bahwa PANGEA dapat menerbitkan 100 makalah penulis pertama dari para ilmuwan di Afrika, yang berkontribusi dalam menutup kesenjangan Indeks Parasut di Afrika Tengah (Culotta et al., 2024). Para ilmuwan Afrika ini akan melanjutkan warisan PANGEA, berkolaborasi dengan rekan-rekan internasional di seluruh wilayah tropis, setelah proyek berakhir. *Bagian 8* dalam Buku Putih menjelaskan pendekatan kami terhadap pelibatan masyarakat. *Bagian 10.1.5* menjelaskan komposisi tim ilmuwan. *Bagian 10.2* membahas peluang untuk pendanaan bersama karena NASA terbatas dalam mendanai lembaga-lembaga di Amerika Serikat. *Bagian 10.3* membahas pendekatan PANGEA untuk Sains Terbuka yang akan memfasilitasi transparansi dan kerja sama.

Sebagian besar responden survei menyatakan dengan antusias bahwa PANGEA akan membina kemitraan yang berarti dengan para pemangku kepentingan (misalnya, masyarakat lokal dan pemerintah). Salah satu responden menekankan, "Ya, karena PANGEA akan memberikan informasi kepada masyarakat lokal yang membantu dalam pengambilan keputusan."

#### **Pemisahan ekosistem darat dan air:**

- "Melihat ekosistem daratan yang terpisah dari ekosistem perairan dapat memberikan pandangan yang bias terhadap fenomena seperti perubahan iklim dan dampaknya terhadap manusia di hutan tropis karena keduanya saling berhubungan"

Sistem terestrial dan akuatik tidak terpisah dalam konsepsi PANGEA. Mungkin cara termudah untuk menunjukkan hal ini adalah tidak adanya bagian khusus yang didedikasikan untuk pertanyaan-pertanyaan sains terestrial dan akuatik. Hal ini terjalin bersama. Bentang alam PANGEA akan berisi lingkungan darat dan perairan. Selain itu, dalam pertanyaan sains 1 dan 3, kami secara implisit menghubungkan lingkungan terestrial dan akuatik melalui arus lateral. Dalam contoh lain pada pertanyaan 21, kami mengaitkan gangguan dan pertumbuhan hutan dengan sumber daya air tawar.

#### **Keterlibatan ilmuwan internasional:**

- "Dari hasil bacaan saya, sudah jelas dan dapat dimengerti. Yang tidak jelas bagi saya adalah bagaimana kita (non-Amerika) dapat mengajukan proyek ke NASA."

NASA hanya dapat mendukung penelitian di lembaga-lembaga AS. Namun, seperti halnya di LBA, kami akan berusaha untuk menggandeng penelitian NASA dengan mitra lokal yang dapat mengakses pendanaan lokal. Selain itu, kami akan secara aktif mencari pendanaan bersama dari organisasi swasta yang saat ini sangat aktif dalam mendanai penelitian lingkungan (*Bagian 10.2*).

**Keterlibatan pemerintah asing:**

- "Pelaksanaan kampanye penelitian lapangan tidak menunjukkan adanya kesulitan, kecuali hubungan antar pemerintah."

Ini merupakan tantangan bagi semua penelitian internasional. NASA memiliki banyak pengalaman melalui banyak kampanye sains di lapangan dan udara. Lihat *Bagian 6.2.4* dan *Kotak 2*.

**Perlunya peningkatan kejelasan pada elemen ilmiah:**

- "Tujuan 1: Mengkarakterisasi dan mengukur respon hutan tropis yang heterogen terhadap perubahan antropogenik. Bagaimana dengan respon hutan tropis terhadap gangguan alam dan iklim (misalnya topan/angin topan, kekeringan, banjir, tanah longsor, dan lain-lain)?"

*Bagian 2.5* mengenai dinamika gangguan telah direvisi secara substansial. Kami sekarang tidak hanya membahas gangguan antropogenik tetapi juga gangguan alami melalui mekanisme yang tercantum dalam komentar. Selain itu, *Bagian 2.3* dan *3.3.2* membahas tentang banjir.

- "Studi PANGAEA perlu meningkatkan integrasi interaksi Alam-Masyarakat. Ilmu sosial dan ilmu manusia perlu lebih dipertimbangkan"

Buku Putih yang telah direvisi mencakup beberapa bagian yang telah direvisi secara substansial yang menjelaskan pertanyaan-pertanyaan kunci untuk studi Sistem Sosial-Ekologi (SES) (*Bagian 2.4*). Tema ilmu pengetahuan PANGAEA ini akan menyelidiki interaksi dan umpan balik antara sistem sosial dan ekologi yang terkait dengan produksi pangan dan ketahanan pangan, praktik budaya, mata pencaharian, strategi pengelolaan, dan ketahanan sistem tropis.

- "Kita berada di abad kecerdasan buatan, yang memiliki dampak pada semua bidang kehidupan dan bahkan pada cara kita mendekati pertanyaan penelitian saat ini dan di masa depan. Saya rasa aspek ini perlu didefinisikan dengan jelas dalam laporan ini."

Dalam revisi Buku Putih *Bagian 6.3.1*, kami membahas masalah ini secara langsung. Sebagai contoh, PANGAEA akan memanfaatkan model kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin (AI/ML) untuk sintesis data karena ketangguhannya dalam menangani non-linearitas dan interaksi di antara proses dan prediktor multifaktorial. AI/ML dapat digunakan lebih lanjut untuk meniru model berbasis proses dan mengeksplorasi ruang parametrik model secara lebih efisien atau menjalankan peramalan jangka pendek/panjang.

### Kurangnya elemen eksperimental dalam lingkup PANGEA:

- "Bagian 3 tidak mencantumkan percobaan pengalihan curah hujan, pemupukan CO<sub>2</sub> atau temperatur, sementara Q8, Q9, Q19, dan Q23 semuanya bergantung pada percobaan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini."

Tanggapan PANGEA terhadap Program Ekologi Terrestrial NASA tidak secara eksplisit mempertimbangkan eksperimen ekosistem yang besar. Eksperimen-eksperimen tersebut sangat berharga dan dapat didanai bersama oleh lembaga-lembaga lain atau donor swasta seperti halnya eksperimen kekeringan Seca-Floresta yang dilakukan di Hutan Nasional Tapajos, Brasil yang didukung oleh dana NSF sebagai bagian dari LBA.

### Pengecualian dari cakupan PANGEA:

- "Bagi kami, hutan tropis di Asia Tenggara tampaknya tidak termasuk dalam studi PANGEA, padahal kita berbicara mengenai ekosistem hutan tropis dan meningkatkan pemahaman kita mengenai bagaimana ekosistem tersebut berfungsi. Mungkin masalah anggaran, strategis atau geopolitik tampaknya ikut berperan di sini, tetapi kami percaya bahwa dengan memperhitungkan semua wilayah hutan tropis akan memungkinkan kami untuk mendapatkan hasil yang lebih holistik dan melakukan pemodelan yang mempengaruhi semua ekosistem hutan tropis."
- "Daerah tropis kering terabaikan, tetapi daerah ini memiliki potensi yang sama pentingnya bagi masa depan siklus karbon terestrial seperti halnya daerah tropis basah, namun kurang dipelajari dan kurang dipahami dengan baik."

Keterbatasan sumber daya tidak memungkinkan kami untuk melakukan kampanye lapangan di semua wilayah tropis. Lihat *Bagian 1.4* tentang domain PANGEA. Kami menyertakan domain yang lebih luas dari hutan lembab pantropis, area yang lebih luas dari kepentingan ilmiah, di mana proyek-proyek tambahan dapat dilakukan melalui kemitraan, dan di mana analisis satelit dan pemodelan akan dilakukan.

Kami tidak menyatakan bahwa daerah tropis kering tidak penting, tetapi kami telah membuat argumen tentang pentingnya hutan lembab dalam siklus karbon dan air global. Tidak mungkin ada bioma tropis lain yang memiliki peran penting bagi karbon seperti halnya hutan lembab. Hutan lembab memiliki penyimpanan karbon yang lebih besar dan fluks karbon yang lebih besar daripada bioma tropis lainnya.

Pada bagian berikut, kami menanggapi semua komentar dari responden survei yang disusun berdasarkan pertanyaan-pertanyaan survei (Q1-Q13). Tanggapan survei ditampilkan dalam bentuk huruf biasa. [Tanggapan PANGEA ditampilkan dengan warna biru](#). Kami tidak membalas tanggapan survei yang jawabannya hanya "ya" atau "tidak". Tanggapan-tanggapan tersebut umumnya disusun berdasarkan urutan penerimaannya. Urutan tersebut tidak sesuai dengan urutan responden yang tercantum di awal dokumen ini. Dalam beberapa kasus, tanggapan diurutkan ulang sehingga kami dapat memberikan satu jawaban untuk komentar yang serupa.

## Q1. Apa kekuatan utama dari studi pelingkupan PANGEA?

1. Saya percaya bahwa upaya kolaboratif PANGEA merupakan inisiatif penting yang dapat mendukung strategi konservasi untuk planet ini dan juga akan mengintegrasikan para ilmuwan dari seluruh dunia dalam upaya bersama untuk melindungi keanekaragaman hayati.
2. *Ciclos biogeoquímicos, biodiversidad, interacciones y retroalimentaciones climáticas, sistemas socioecológicos y dinámica de las perturbaciones.* (Siklus biogeokimia, keanekaragaman hayati, interaksi dan umpan balik iklim, sistem sosio-ekologi dan dinamika gangguan).
3. Studi ini terorganisir dengan baik dan multidisiplin serta mencakup studi yang diperlukan untuk mengisi kesenjangan dalam ekosistem yang paling rentan di dunia.
4. PANGEA akan menggunakan alat baru untuk mempelajari hutan tropis.
5. Ini adalah tentang pengumpulan data *digital* [Ini tentang pengumpulan data yang didigitalkan].
6. Ini adalah integrasi dari berbagai bidang; ini adalah studi multidisiplin.
7. Kekuatan utama dari studi pelingkupan PANGEA adalah fakta bahwa inisiatif ini berfokus pada area di mana terdapat banyak kesenjangan dalam hal pengetahuan dan di mana Pemerintah Afrika tidak memiliki sarana finansial dan teknis untuk bekerja.
8. Saya menemukan bahwa fokus pada hutan Afrika sangat luar biasa; PANGEA akan membahas ketidakpastian yang sangat penting tentang peran benua Afrika dalam sistem bumi tanpa mengesampingkan peran sentral yang dimainkan oleh hutan hujan Amazon.
9. Salah satu kekuatan utama dari studi pelingkupan PANGEA terletak pada pendekatannya yang menyeluruh dalam mengatasi kesenjangan dalam pemahaman kita mengenai hutan tropis. Studi ini menyoroti masalah representasi yang tidak memadai dalam kampanye lapangan, yang mengarah pada penggambaran yang keliru tentang sifat fisik dalam dinamika lingkungan. PANGEA bertujuan untuk mengatasi tantangan ini dengan mengimplementasikan kampanye multiskala untuk menggambarkan proses biogeokimia di hutan tropis, yang merupakan kekuatan signifikan lainnya. Para penulis telah mempertimbangkan dengan seksama sumber-sumber data yang ada dan menyusun rencana untuk memprioritaskan dan mengoptimalkan pengumpulan data, memanfaatkan waktu dan sumber daya secara efisien. Selain itu, PANGEA dibangun berdasarkan pengalaman kampanye Ekologi Terestrial NASA sebelumnya, yaitu Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA), yang menawarkan kesempatan untuk meningkatkan model global NASA dengan mengumpulkan data spasial dan temporal yang lebih komprehensif mengenai dinamika global.
10. Kejelasan pertanyaan penelitian. Kondisi pengetahuan saat ini tentang topik yang akan dieksplorasi. Mitra yang terlibat di berbagai wilayah penelitian. Melatih dan mendidik perspektif generasi ilmuwan berikutnya.
11. Tema-tema ilmiah yang diangkat sangat komprehensif dan menyentuh aspek-aspek terpenting dari dinamika ekosistem tropis serta implikasi iklim dan sosial-ekologi. Kesenjangan pengetahuan dan pertanyaan-pertanyaan diidentifikasi secara jelas dengan masukan dari masyarakat.
12. PANGEA sangat jeli dalam memilih untuk mengisi kekosongan dari kampanye-kampanye sebelumnya, termasuk menangani data yang hampir tidak ada untuk beberapa hutan tropis. Penggunaan satelit menjadi sangat penting untuk sebagian besar studi ilmiah lingkungan dan pengambilan keputusan, dan oleh karena itu, keakuratannya dalam aplikasi penelitian ini menjadi

sangat penting. Telah diketahui bahwa representasi model pada hutan, karena perbedaan proses konvektif, menimbulkan kesulitan besar dalam parameterisasi, menghasilkan respon dengan standar deviasi yang sangat besar. Kampanye yang tidak dilaksanakan secara optimal dan kurangnya data yang spesifik semakin memperumit banyak penelitian yang ada. Menganalisis dan membandingkan hutan yang menunjukkan perilaku yang berbeda akan sangat bermanfaat bagi komunitas ilmiah dalam memajukan studi tentang masa depan planet kita. Proposal ini tampaknya berhasil memberikan kesempatan bagi generasi baru ilmuwan dan mengusulkan pembuatan basis data terbuka. Saya sangat senang mengetahui bahwa proposal ini berpotensi membuka pintu di luar akademisi dan lembaga antariksa, untuk para pembuat keputusan, komunitas, dan siapa pun yang tertarik untuk membantu.

13. Landasan ilmiah, ruang lingkup yang luas dengan area fokus yang jelas, rencana penggunaan satelit yang dikembangkan dengan baik, rencana pemodelan yang dikembangkan dengan baik, pelibatan banyak komunitas lokal dan rencana keterlibatan yang dikembangkan dengan baik, rencana implementasi, dan rencana pengembangan kapasitas dan pendidikan.
14. Fokusnya adalah meningkatkan pengamatan dan pemahaman tentang beberapa ekosistem yang paling tidak dikenal namun rentan. PANGEA mengatasi kesenjangan dan tantangan penelitian ilmu bumi yang terkenal: kurangnya data dan pengetahuan tentang daerah tropis.
15. Penyertaan fokus utama pada sistem tropis di Afrika merupakan kekuatan utama. Tim yang beragam yang terkait dengan proyek ini sangat mengesankan, terutama keahlian yang beragam dan saling melengkapi dari para anggota tim. Terdapat pemahaman yang kuat mengenai kelebihan/kekurangan lintas skala dari berbagai pendekatan penginderaan jauh yang disajikan. Karena sudah terbiasa dengan pekerjaan banyak anggota tim, saya tidak terkejut sama sekali dengan hal ini, tetapi saya lebih tertarik pada seberapa baik isu-isu ini ditata dan ditangani. Menggabungkan berbagai sumber data penginderaan jauh dapat menjadi rumit dan makalah ini merinci bagaimana pendekatan yang dilakukan dalam konteks pertanyaan-pertanyaan sains dengan cara yang menyeluruh dan bijaksana yang menunjukkan potensi besar untuk keberhasilan komponen proyek ini. Saya sangat menyukai kerangka kerja ambang batas yang optimal dan mendasar yang digunakan secara keseluruhan. Tabel satu dan empat merupakan tabel yang paling komprehensif (dan mudah dibaca) yang pernah saya lihat. Dari apa yang saya lihat, ini adalah pertimbangan yang kuat untuk bekerja dengan mitra lokal yang merupakan suatu keharusan untuk ilmu pengetahuan semacam ini.
16. PANGEA merupakan program penelitian yang sangat ambisius, namun dapat dicapai, yang akan menjawab salah satu tantangan terbesar yang kita hadapi saat ini, yaitu memahami pola dan proses serta heterogenitas yang mengatur hutan tropis di seluruh dunia.
17. Saya dapat melihat kekuatan dari penelitian ini pada dua tingkat:
  - a. Yang pertama adalah keberhasilan menyatukan komunitas ilmiah yang luas dari berbagai cakrawala, untuk tidak mengatakan semua cakrawala bumi. Semua ilmuwan dari negara-negara tropis dan wilayah lain di dunia tampaknya terwakili, yang memastikan bahwa sebagian besar sudut pandang diperhitungkan untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan utama yang menjadi tantangan bagi pemahaman yang tepat tentang fungsi ekosistem tropis.
  - b. Poin kuat kedua dari studi ini adalah bahwa studi ini memperhitungkan isu-isu utama yang dihadapi umat manusia yang terkait langsung dengan fungsi ekosistem hutan tropis: ini adalah poin kuat dari studi eksplorasi PANGEA. Memang, perubahan iklim (yang mencakup banyak

isu lain yang diperhitungkan dalam studi ini, seperti deforestasi, perubahan penggunaan lahan, kekeringan, siklus karbon, dan lain-lain) dan keanekaragaman hayati merupakan salah satu masalah utama yang menjadi tantangan besar bagi umat manusia dan kehidupan di planet bumi.

18. PANGEA sangat jeli dalam memilih untuk mengisi kekosongan dari kampanye-kampanye sebelumnya, termasuk menangani data yang hampir tidak ada untuk beberapa hutan tropis. Penggunaan satelit menjadi sangat penting bagi sebagian besar studi ilmiah lingkungan dan pengambilan keputusan, dan oleh karena itu, keakuratannya dalam aplikasi penelitian ini menjadi sangat penting. Telah diketahui bahwa representasi model pada hutan, karena perbedaan proses konvektif, menimbulkan kesulitan besar dalam parameterisasi, menghasilkan respon dengan standar deviasi yang sangat besar. Kampanye yang tidak dilaksanakan secara optimal dan kurangnya data yang spesifik semakin memperumit banyak penelitian yang ada. Menganalisis dan membandingkan hutan yang menunjukkan perilaku yang berbeda akan sangat bermanfaat bagi komunitas ilmiah dalam memajukan studi tentang masa depan planet kita. Proposal ini tampaknya berhasil memberikan kesempatan bagi generasi baru ilmuwan dan mengusulkan pembuatan basis data terbuka. Saya sangat senang mengetahui bahwa proposal ini berpotensi membuka pintu di luar akademisi dan lembaga antariksa, untuk para pembuat keputusan, komunitas, dan siapa pun yang tertarik untuk membantu.
19. Ini adalah konsep yang dikembangkan di sekitar pengukuran penting yang optimal, dasar dan ambang batas yang diperlukan untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan; pendekatan inklusivitas dan akhirnya keterlibatan ilmuwan lokal yang akan menjamin keberlanjutan penelitian setelah kampanye tersebut.
20. Saya yakin proyek ini memiliki banyak kekuatan, di antaranya adalah tujuan yang dikembangkan dengan baik untuk memajukan pengetahuan dan meningkatkan metode untuk memahami hutan tropis, tim yang besar dan kompeten, serta berbagai organisasi mitra yang akan membantu mengoperasionalkan gagasan-gagasan ini.
21. Keterlibatan masyarakat, perspektif lintas benua, dan penekanan pada peran flora pohon yang berbeda dalam mendorong variabilitas antarbenua dalam fungsi ekosistem
22. Ini adalah cakupan pekerjaan yang sangat besar yang akan mengandalkan bantuan dan pelaksanaan dari beberapa kelompok kerja serta penduduk asli daerah yang akan diteliti. Setelah membacanya dengan seksama, proyek ini tampak terikat dengan baik. Seiring dengan berkembangnya penelitian, perbaikan-perbaikan spesifik mungkin diperlukan, tetapi secara keseluruhan proposal ini terstruktur dengan sangat baik.

Kami menghargai komentar-komentar di atas, namun kami tidak memiliki tanggapan langsung atas komentar-komentar tersebut.

## **Q2. Bidang-bidang apa saja dari studi PANGEA yang perlu ditingkatkan lebih lanjut?**

- Proyek ini ditampilkan sebagai proyek kolaboratif antara para ilmuwan. Hal ini juga mencakup pengetahuan penduduk asli dan masyarakat adat setempat tentang ekosistem. Saya ragu apakah penduduk setempat merupakan bagian dari tim kolaboratif atau hanya sebagai penerima hasil.

PANGEA telah melakukan upaya yang kuat sejak awal untuk melibatkan masyarakat lokal dan Masyarakat Adat. Proses produksi bersama pengetahuan dimulai pada saat pelingkupan PANGEA dan penulisan buku putih, yang telah dilakukan melalui kerja sama dengan para pemimpin Masyarakat Adat dari Aliansi Global Masyarakat Teritorial (GATC). Jika PANGEA terpilih, produksi bersama dengan Masyarakat Adat dan Komunitas Lokal akan segera dimulai dan akan terus berlanjut.

- Implikasi perempuan dalam kegiatan penyerapan karbon.

PANGEA telah melakukan upaya yang kuat untuk melibatkan perempuan dalam semua kegiatan pelingkupan. Kami tidak secara khusus membahas kegiatan perempuan dalam penyerapan karbon dalam laporan pelingkupan kami. Hal tersebut merupakan salah satu dari sekian banyak perhatian khusus yang mungkin muncul dalam proyek penelitian. Buku Putih kami, meskipun komprehensif, masih memiliki ruang lingkup yang terbatas.

- *Sur le plan local national régional international et mondial* [Pada rencana lokal, nasional, regional, internasional dan global]
- Lebih koheren dan spesifik mengenai penyelarasan pembangunan kapasitas dengan rencana aksi pemerintah Afrika, halaman 15 / 61.
- Di Republik Demokratik Kongo misalnya

PANGEA bergerak secara luas di Afrika, Amerika Selatan, dan Asia, sebagaimana dirinci dalam *Lampiran C Buku Putih*.

- Bagaimana kita dapat mempromosikan integrasi interdisipliner, dan bagaimana masyarakat lokal dapat diintegrasikan ke dalam proyek untuk berpartisipasi secara aktif? Bagaimana gagasan untuk meningkatkan pelatihan, pendidikan, dan ilmu pengetahuan.

Buku Putih ini dibentuk oleh tim yang sangat beragam seperti yang dirinci dalam *Lampiran C*. Secara khusus, kami menyadari pentingnya tim yang beragam untuk peningkatan pelatihan dan pendidikan. Pendekatan PANGEA terhadap ilmu pengetahuan yang merata, peningkatan kapasitas, dan pelatihan akan secara langsung berhadapan dengan masalah kampanye flyover dan ilmu pengetahuan parasut. Berdasarkan keberhasilan dari LBA, kami percaya bahwa PANGEA dapat menerbitkan 100 makalah penulis pertama dari para ilmuwan di Afrika, yang berkontribusi dalam menutup kesenjangan Indeks Parasut di Afrika Tengah (Culotta et al., 2024). Para ilmuwan Afrika ini akan melanjutkan warisan PANGEA, berkolaborasi dengan rekan-rekan internasional di seluruh wilayah tropis, setelah proyek ini berakhir.

- Lebih tertarik pada interaksi Alam-Masyarakat

Buku Putih yang telah direvisi mencakup bagian yang secara substansial direvisi yang menjelaskan pertanyaan-pertanyaan kunci untuk studi sistem Sosial-Ekologi (SES) (*Bagian 2.4*). Tema ilmu pengetahuan PANGEA ini akan menyelidiki interaksi dan umpan balik antara sistem sosial dan ekologi yang terkait dengan produksi pangan dan ketahanan pangan, praktik budaya, mata pencaharian, strategi pengelolaan, dan ketahanan sistem tropis.

- Bagian 3.1.1 Cadangan dan Fluks Karbon: Menurut saya, bagian ini gagal menunjukkan keterbatasan serius dari pendekatan yang ada saat ini untuk memantau ekosistem terestrial di daerah tropis. Siklus karbon di ekosistem ini kurang lebih seimbang, tetapi mengingat stok yang besar dan fluks yang besar (GPP, Respirasi dan pembakaran biomassa), sedikit perubahan dalam keseimbangan proses ini dapat memiliki konsekuensi besar pada neraca karbon global. Bahkan pengukuran CO<sub>2</sub> yang sempurna sekalipun tidak akan memberikan banyak informasi yang berguna mengenai proses siklus karbon, namun kapasitas prediksi model Sistem Bumi kita bergantung pada kemampuannya untuk memodelkan GPP dan respirasi. Model-model proses ini tidak dapat dilakukan dengan baik (jika ada) di daerah tropis oleh sistem pemantauan yang ada saat ini. Tidak seperti ekosistem beriklim sedang yang menunjukkan variasi musiman yang besar dalam pertukaran CO<sub>2</sub> bersih, ekosistem tropis menunjukkan variasi musiman yang kecil karena GPP dan respirasi cenderung hampir sama sepanjang tahun. Oleh karena itu, CO<sub>2</sub> atmosfer hampir konstan di daerah tropis - meskipun terdapat fluks kotor yang sangat besar. Selain itu, sulit untuk memisahkan tren regional dari "gangguan" siklus karbon akibat perbedaan hari ke hari dalam hal kekeruhan atau efek penyearah diurnal (Denning dkk., 1995) terhadap konsentrasi CO<sub>2</sub>.
- Ada solusi potensial, yaitu karbonil sulfida (OCS). Gas ini melacak GPP sedangkan CO<sub>2</sub> melacak NEE. Hal ini dikarenakan OCS diserap oleh daun namun tidak ada (atau sangat kecil) pelepasan OCS dari ekosistem darat. Beberapa tahun yang lalu kami mengusulkan bahwa OCS dapat memberikan jendela baru ke dalam siklus karbon - terutama di daerah tropis (Berry et al., 2013). Pengukuran oleh satelit, MIPAS (Stinecipher dkk., 2022) dan TES (Wang dkk., 2023) menunjukkan adanya penipisan konsentrasi OCS yang signifikan di troposfer bagian atas. Selama dua tahun terakhir, kelompok Luciana Gatti di INPE telah melakukan lebih dari 800 pengukuran labu OCS (bersama dengan gas-gas GRK lainnya) dari profil pesawat terbang yang dilakukan di atas Cekungan Amazon. Seperti yang diharapkan, hasil pengukuran ini menunjukkan gradien yang jauh lebih besar (10-100 kali lipat) dalam konsentrasi relatif OCS dibandingkan dengan konsentrasi CO<sub>2</sub>. Oleh karena itu, OCS memberikan dasar yang lebih baik untuk melakukan inversi atmosfer, dan dapat memberikan informasi langsung mengenai GPP dan respirasi. Pengukuran satelit, profil pesawat terbang, dan kemungkinan spektrometri FT-IR yang melihat matahari (Hannigan et al., 2021) merupakan pendekatan yang menjanjikan untuk membangun program pemantauan siklus karbon berbasis OCS di daerah tropis.

#### Referensi:

- Berry J, Wolf A, Campbell JE, Baker I, Blake N, Blake D, Denning AS, Kawa SR, Montzka SA, Seibt U, Stimler K. Sebuah model gabungan dari siklus global karbonil sulfida dan CO<sub>2</sub> : Jendela baru yang mungkin pada siklus karbon. *Jurnal Penelitian Geofisika: Biogeosains*. 2013 Jun; 118(2):842-52. doi:10.1002/jgrg.20068
- Denning AS, Fung IY, Randall D. Gradien lintang CO atmosfer<sub>2</sub> karena pertukaran musiman dengan biota darat. *Nature*. 1995 Jul 20;376(6537):240-3.
- Hannigan JW, Ortega I, Shams SB, Blumenstock T, Campbell JE, Conway S, Flood V, Garcia O, Griffith D, Grutter M, Hase F. Analisis tren OCS atmosfer global dari 22 stasiun NDACC. *Jurnal Penelitian Geofisika: Atmosfer*. 2022 Feb 27; 127(4). doi: 10.1029/2021JD035764

Stinecipher JR, Cameron-Smith P, Kuai L, Glatthor N, Höpfner M, Baker I, Beer C, Bowman K, Lee M, Miller SM, Parazoo N. Karbonil sulfida yang diindera dari jarak jauh membatasi estimasi model produktivitas primer Amazon. *Surat Penelitian Geofisika*. 2022 Mei 16; 49(9). doi: 0.1029/2021GL096802

Wang X, Jiang X, Li KF, Liang MC, Kuai L, Tan L, Yung YL. Variasi Karbonil sulfida selama musim kemarau/basah di Amazon. *Surat Penelitian Geofisika*. 2023 Mar 16;50(5):e2022GL101717.

Komentar tersebut mengangkat isu penting dalam studi hutan tropis yang juga telah kami bahas dalam Buku Putih kami. Agar lebih responsif terhadap pertanyaan spesifik mengenai penggunaan variasi rasio pencampuran atmosfer karbonil sulfida (COS) untuk membatasi GPP, kami telah menyertakan potensi pentingnya pengukuran tersebut dalam *Bagian 2.2*.

- Salah satu area yang dapat ditingkatkan dalam studi PANGEA adalah kurangnya strategi yang jelas untuk meningkatkan hasil secara spasial. Meskipun hal ini mungkin berada di luar cakupan studi saat ini atau terlalu dini karena masih berupa proposal, tetap penting untuk mempertimbangkan bagaimana hasil penelitian ini akan dikomunikasikan kepada masyarakat umum. Faktor kunci dalam keberhasilan proyek global seperti MODIS adalah kemampuannya untuk menyaring kompleksitas dunia menjadi beberapa pendorong utama. Sebagai contoh, produk MODIS LAI mengklasifikasikan kanopi berdasarkan enam tipe bioma, menawarkan pandangan global yang disederhanakan namun efektif untuk non-ahli. Namun, model-model tersebut seringkali salah mengklasifikasikan atau salah menggambarkan bioma karena kurangnya data, yang menggarisbawahi pentingnya hasil PANGEA untuk mengisi kekosongan tersebut.

Pelajaran dari MODIS sangat relevan. PANGEA menyediakan kerangka kerja untuk menskalakan dan mengintegrasikan pengukuran dari udara dan satelit dengan pengamatan lapangan in situ, pengukuran menara fluks eddy-covariance, dan model untuk memajukan pemahaman ilmiah dan kemampuan penginderaan jarak jauh di seluruh area tematik yang secara langsung menangani tujuan Area Fokus Siklus Karbon dan Ekosistem NASA, selaras dengan Area Fokus Siklus Air dan Energi dan Variabilitas dan Perubahan Iklim. PANGEA akan membangun jaringan kampanye lapangan dan udara terkoordinasi yang didistribusikan di seluruh ekosistem hutan tropis yang ditargetkan untuk mengisi kesenjangan data dan memungkinkan penskalaan antara lapangan dan kumpulan data yang diindera dari jarak jauh, serta pemodelan skala regional dan pantropis. Seperti yang dicatat dalam komentar tersebut, pendekatan penskalaan spesifik akan dikembangkan sebagai bagian dari Rencana Percobaan Ringkas dan melalui proposal dan kegiatan Tim Sains.

- Sehubungan dengan dinamika karbon, saya melihat ada tiga area utama yang perlu ditingkatkan:
  - Kurangnya pengukuran jejak gas di udara untuk menginformasikan neraca karbon skala cekungan
  - Kurangnya rencana konkret untuk mengukur komponen fluks karbon skala cekungan, yaitu fotosintesis, respirasi, dan emisi kebakaran
  - Kurang fokus di musim hujan

- Area yang hilang ini sangat penting bagi tujuan PANGEA untuk "Membatasi ketidakpastian model prediksi fluks karbon tropis di masa depan" (baris 312, halaman 10).
- Komponen ilmu pengetahuan udara dari PANGEA saat ini hanya berfokus pada pengamatan penginderaan jarak jauh dari udara (Bagian 6.2.3, halaman 64) tanpa menyebutkan pengamatan jejak gas (misalnya, CO<sub>2</sub>, CO, dan CH<sub>4</sub>) untuk menginformasikan kuantifikasi fluks karbon skala benua. Tanpa pengukuran ini, kecil kemungkinan kita dapat mengurangi ketidakpastian yang besar pada neraca karbon bersih skala cekungan dan komponen fluks karbon atau mengubah pemahaman tentang dinamika karbon skala benua di daerah tropis. Perlu dicatat bahwa beberapa inversi atmosfer global telah mengasimilasi konsentrasi CO<sub>2</sub> rata-rata kolom yang diamati oleh satelit (misalnya, OCO-2 MIP). Inversi ini memiliki ketidakpastian yang lebih besar di daerah tropis dibandingkan di daerah lintang tengah, karena seringnya tutupan awan di musim hujan, musim yang lebih lemah dan sinyal yang lebih kecil dari fluks karbon bersih, dan kurangnya jaringan menara in situ dan pengamatan udara. Jika PANGEA hanya menggunakan konsentrasi rata-rata kolom CO<sub>2</sub> yang diamati oleh satelit untuk membatasi anggaran karbon di Amazon dan Afrika tropis, maka tidak ada kemajuan dibandingkan dengan kondisi lapangan saat ini, dan bagi saya ini adalah kesempatan yang terlewatkan.
- Saya juga ingin mencatat bahwa pengukuran jejak gas di udara telah memainkan peran penting dalam kampanye lapangan NASA sebelumnya, seperti pengukuran profil vertikal Manaus selama LBA (<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1175>) dan pengukuran jejak gas di udara CARVE dan Arktik-CAP selama ABoVE (Sweeney dkk., 2022). Pengukuran jejak gas ini membantu mengidentifikasi emisi metana yang besar di Amazon bagian timur (Miller dkk., 2007) dan Alaska bagian utara (Chang dkk., 2014) serta mengungkap pola fotosintesis dan respirasi skala bioma, yang berbeda dengan simulasi model biosfer terestrial (Commane dkk., 2017; Hu dkk., 2021). Tantangan yang dihadapi dalam pengamatan gas rumah kaca berbasis satelit di wilayah tropis (Frankenberg et al., 2024) seharusnya dapat memotivasi lebih banyak lagi pengamatan jejak gas di udara untuk melengkapi pengamatan dari satelit. Memang, PANGEA mungkin tidak akan mengulangi apa yang telah dilakukan oleh LBA dan ABoVE, tetapi mengingat kurangnya pengukuran jejak gas in situ yang berasal dari Amazon dan Afrika tropis, maka akan menjadi kelalaian jika tidak mempertimbangkan nilai unik dari pengukuran jejak gas di udara untuk penelitian siklus karbon.
- Hal ini juga dapat membantu PANGEA untuk mengidentifikasi lembaga-lembaga lokal yang berkolaborasi dalam mengumpulkan pengukuran jejak gas di udara. Sebagai contoh, sebagian besar kemajuan terbaru dalam memahami keseimbangan karbon Amazon didasarkan pada pengukuran jejak gas di udara yang dikumpulkan oleh kelompok Luciana Gatti di Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil (Gatti et al., 2014, 2021, 2023). Ini berarti bahwa PANGEA mungkin tidak perlu memulai dari awal untuk melakukan pengukuran seperti itu; sudah ada mitra lokal yang dapat diandalkan. Memanfaatkan kemitraan lokal tampaknya sangat penting untuk memfasilitasi pengukuran jejak gas di udara yang padat karya, yang merupakan kunci untuk memahami dinamika karbon skala cekungan.

Salah satu hambatan dalam penggunaan yang efektif dari data kelimpahan kolom total satelit saat ini untuk gas-gas jejak adalah kurangnya data kalibrasi dan validasi yang efektif di daerah tropis (Bagian 3.1.1). Komentar tersebut menganjurkan untuk melakukan pengukuran tambahan melalui udara terhadap gas-gas jejak yang kami akui di Bagian 3.1.1.

- Sebagai catatan tambahan, tidak ada indikasi bagaimana kampanye penginderaan jarak jauh dari udara dan pengamatan satelit yang direncanakan akan membantu memecahkan masalah pemisahan fotosintesis dan respirasi dari neraca karbon bersih. Mengukur fotosintesis dan respirasi secara terpisah adalah penting karena keduanya merespons iklim secara berbeda dan masalah ini merupakan inti dari ketidakpastian model dalam proyeksi siklus karbon di masa depan di daerah tropis. Pengukuran konsentrasi dan fluks CO<sub>2</sub> tidak dapat secara unik membatasi fotosintesis dan respirasi secara bersamaan. Meskipun buku putih PANGEA mengutip fluoresensi klorofil yang diinduksi oleh matahari (SIF) sebagai proksi fotosintesis, SIF tidak dapat membatasi besarnya asimilasi karbon fotosintesis karena model-model berbasis SIF saat ini semuanya bergantung pada hubungan statistik di tingkat lokasi antara SIF dan fotosintesis. Pengamatan serentak terhadap serangkaian gas jejak siklus karbon, termasuk isotop karbon dan oksigen (13C- CO<sub>2</sub> dan 18O- CO<sub>2</sub> ), karbonil sulfida, dan karbon monoksida, diperlukan untuk sepenuhnya membatasi komponen fluks karbon utama dan menginformasikan proses siklus karbon dalam model. Ada beberapa contoh sukses dalam menggunakan pengukuran gas jejak CARVE untuk secara terpisah membatasi fotosintesis dan respirasi pada domain ABoVE (Hu et al., 2021; Kuai et al., 2022), sehingga hal ini tidak mustahil untuk dilakukan.

Seperti yang telah disebutkan pada jawaban (9) di atas, kami telah mempertimbangkan karbonil sulfida. Selain itu, kami telah mendaftarkan CO, COS dan isotop di antara pengukuran potensial untuk menyelesaikan pertanyaan partisi karbon.

- Poin terakhir saya untuk pertanyaan ini berkaitan dengan musim hujan. Saya heran mengapa PANGEA membatasi pengukuran hanya pada "awal musim kemarau" dan "akhir musim kemarau" tanpa mempertimbangkan pengukuran yang terus menerus selama musim kemarau dan musim hujan (baris 477-484, halaman 15). Pertama, kita tidak akan memiliki pengetahuan yang akurat mengenai keseimbangan karbon di wilayah tropis jika kita memiliki kesenjangan pengukuran di separuh waktu. Kedua, terbatasnya pandangan mengenai dinamika karbon musim hujan dari satelit gas rumah kaca (Frankenberg dkk., 2024) seharusnya membutuhkan lebih banyak, bukan lebih sedikit, pengukuran di musim hujan. Ketiga, gangguan musim hujan seperti tumbangnya pohon akibat angin merupakan penyebab utama hilangnya biomassa di atas permukaan tanah. Memang ada tantangan logistik pada musim hujan, namun mengabaikannya sama sekali adalah sebuah kesempatan yang terlewatkan.

Terminologi "awal musim kemarau" dan "akhir musim kemarau" membingungkan, sehingga kami mengubahnya. Inti dari waktu kampanye adalah untuk memotret hutan ketika hutan secara fisiologis memiliki air yang cukup (akhir musim hujan) dan pada saat hutan mengalami kekurangan air (akhir musim kemarau). Untuk menyeimbangkan biaya dan manfaat dari misi udara untuk pengamatan penginderaan jauh permukaan dengan menggunakan sensor optik, kami percaya bahwa menghindari puncak musim hujan merupakan tindakan yang bijaksana. Namun, kami telah menyoroti pentingnya pengukuran berkelanjutan di lokasi lapangan untuk mencakup berbagai kondisi musiman. Selain itu, kami menganjurkan potensi pengukuran dengan drone untuk juga menyediakan cakupan musiman di area yang terbatas.

#### Referensi

Chang, R. Y.-W., Miller, C. E., Dinardo, S. J., Karion, A., Sweeney, C., Daube, B. C., Henderson, J. M., Mountain, M. E., Eluszkiewicz, J., Miller, J. B., Bruhwiler, L. M. P., & Wofsy, S. C.

- (2014). Emisi metana dari Alaska pada tahun 2012 dari pengamatan udara CARVE. *Prosiding National Academy of Sciences*, 111(47), 16694-16699. <https://doi.org/10.1073/pnas.1412953111>
- Commane, R., Lindaas, J., Benmergui, J., Luus, K. A., Chang, R. Y.-W., Daube, B. C., Euskirchen, E. S., Henderson, J. M., Karion, A., Miller, J. B., Miller, SM, Parazoo, NC, Randerson, JT, Sweeney, C., Tans, P., Thoning, K., Veraverbeke, S., Miller, CE, & Wofsy, SC (2017). Sumber karbon dioksida dari Alaska didorong oleh peningkatan respirasi awal musim dingin dari tundra Arktik. *Prosiding National Academy of Sciences*, 114(21), 5361-5366. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618567114>
- Frankenberg, C., Bar-On, Y. M., Yin, Y., Wennberg, P. O., Jacob, D. J., & Michalak, A. M. (2024). Kekeringan Data di Daerah Tropis Lembab: Cara Mengatasi Penghalang Awan dalam Penginderaan Jauh Gas Rumah Kaca. *Geophysical Research Letters*, 51(8), e2024GL108791. <https://doi.org/10.1029/2024GL108791>
- Gatti, L. V., Gloor, M., Miller, J. B., Doughty, C. E., Malhi, Y., Domingues, L. G., Basso, L. S., Martinewski, A., Correia, C. S. C., Borges, V. F., Freitas, S., Braz, R., Anderson, L. O., Rocha, H., Grace, J., Phillips, O. L., & Lloyd, J. (2014). Sensitivitas kekeringan pada keseimbangan karbon Amazon yang diungkap oleh pengukuran atmosfer. *Nature*, 506(7486), 76-80. <https://doi.org/10.1038/nature12957>
- Gatti, L. V., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Gatti Domingues, L., Cassol, H. L. G., Tejada, G., Aragão, L. E. O. C., Nobre, C., Peters, W., Marani, L., Arai, E., Sanches, A. H., Corrêa, S. M., Anderson, L., Von Randow, C., Correia, C. S. C., Crispim, S. P., & Neves, R. A. L. (2021). Amazonia sebagai sumber karbon yang terkait dengan deforestasi dan perubahan iklim. *Nature*, 595(7867), 388-393. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03629-6>
- Gatti, L. V., Cunha, C. L., Marani, L., Cassol, H. L. G., Messias, C. G., Arai, E., Denning, A. S., Soler, L. S., Almeida, C., Setzer, A., Domingues, L. G., Basso, L. S., Miller, J. B., Gloor, M., Correia, C. S. C., Tejada, G., Neves, R. A. L., Rajao, R., Nunes, F.,... Machado, G. B. M. (2023). Peningkatan emisi karbon Amazon terutama disebabkan oleh penurunan penegakan hukum. *Nature*, 621(7978), 318-323. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06390-0>
- Hu, L., Montzka, SA, Kaushik, A., Andrews, AE, Sweeney, C., Miller, J., Baker, IT, Denning, S., Campbell, E., Shiga, Y.P., Tans, P., Siso, MC, Crotwell, M., McKain, K., Thoning, K., Hall, B., Vimont, I., Elkins, JW, Whelan, ME, & Suntharalingam, P. (2021). Hubungan GPP yang diturunkan dari COS dengan suhu dan cahaya membantu menjelaskan amplifikasi siklus musiman CO di atmosfer lintang tinggi. *Prosiding National Academy of Sciences*, 118(33), e2103423118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2103423118>
- Kuai, L., Parazoo, NC, Shi, M., Miller, CE, Baker, I., Bloom, AA, Bowman, K., Lee, M., Zeng, Z., Commane, R., Montzka, SA, Berry, J., Sweeney, C., Miller, BJ, & Yung, JL (2022). Mengukur Produktivitas Primer Bruto Lintang Tinggi Utara (GPP) Menggunakan Karbonil Sulfida (OCS). *Siklus Biogeokimia Global*, 36(9). <https://doi.org/10.1029/2021GB007216>

Miller, JB, Gatti, LV, d'Amelio, MT, Crotwell, AM, Dlugokencky, EJ, Bakwin, P, Artaxo, P, & Tans, PP (2007). Pengukuran dari udara menunjukkan adanya emisi metana yang besar dari cekungan Amazon bagian timur. *Geophysical Research Letters*, 34(10), 2006GL029213. <https://doi.org/10.1029/2006GL029213>

Sweeney, C., Chatterjee, A., Wolter, S., McKain, K., Bogue, R., Conley, S., Newberger, T., Hu, L., Ott, L., Poulter, B., Schiferl, L., Weir, B., Zhang, Z., & Miller, CE (2022). Menggunakan profil vertikal gas jejak atmosfer untuk mengevaluasi fluks model: Studi kasus pengamatan Arctic-CAP dan simulasi GEOS untuk domain ABoVE. *Kimia dan Fisika Atmosfer*, 22(9), 6347-6364. <https://doi.org/10.5194/acp-22-6347-2022>

- Tidak jelas bagi saya sejauh mana hutan tropis ke zona transisi subtropis akan dipelajari sebagai pengganti kondisi masa depan atau dampak perubahan permukaan lahan terhadap fungsi hutan tropis. Delineasi hutan tropis pada Gambar 6 sudah jelas, tetapi jika PANGAEA berarti 'pan-tropis', dan mengingat besarnya peran deforestasi hutan tropis di seluruh sistem studi, tidak jelas bagi saya bagaimana sistem savana/cerrado, deforestasi, pertanian, atau padang rumput dapat diintegrasikan untuk meningkatkan pemahaman kita mengenai peran unik hutan tropis itu sendiri. Benua Maritim dan hutan Asia Tenggara memberikan konteks penting bagi sistem hutan hujan lainnya, tetapi juga memahami kebutuhan untuk menjaga ruang lingkup tetap masuk akal, dan sistem tropis ini akan diintegrasikan ke dalam penelitian.

Seperti yang ditunjukkan oleh komentar tersebut, cakupan potensi studi PANGAEA sangat luas. Dalam draf Buku Putih, kami secara longgar menggunakan istilah "daerah tropis". Namun, proposal studi kami berfokus pada hutan tropis lembab. Hal ini telah diperjelas dalam *Bagian 1.4*.

- Ini adalah cakupan pekerjaan yang sangat besar yang akan mengandalkan bantuan dan pelaksanaan dari beberapa kelompok kerja serta penduduk asli daerah yang akan diteliti. Setelah membacanya dengan seksama, proyek ini tampak terikat dengan baik. Seiring dengan berkembangnya penelitian, perbaikan-perbaikan spesifik mungkin diperlukan, tetapi secara keseluruhan proposal ini terstruktur dengan sangat baik.
- Satu hal yang terlintas di benak saya adalah bahwa proyek ini cukup ambisius dalam hal nafas pertanyaan sains yang ingin dijawab.

Kami setuju bahwa cakupannya sangat besar, oleh karena itu kami mengandalkan kemitraan sejak awal pelingkupan. Kami juga secara aktif menjajaki pendanaan bersama (*Bagian 10.2*).

- Keterlibatan universitas lokal dan pusat penelitian/laboratorium nasional. Dari lokasi penelitian (dilengkapi dengan eddy covariance) yang disebutkan, terlihat bahwa menara EC tersebut adalah menara yang PI-nya berasal dari Amerika Serikat, namun, mungkin saja ada yang lain. Hal menarik lainnya yang mungkin dapat ditingkatkan adalah mempertimbangkan Meksiko. Setidaknya terdapat dua lokasi EC di area yang diminati oleh PANGAEA:
  - El Palmar di Yucatán (ref: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019JG005629>) La Orduña di Veracruz (ref: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018JG004911>) Calakmul di Campeche (dalam tahap konstruksi, namun akan beroperasi pada tahun 2025),

- o Lokasi penelitian lain yang beroperasi di hutan kering tropis di Sonora, batas distribusi paling atas meliputi: Alamos di Sonora (<https://ameriflux.lbl.gov/sites/siteinfo/MX-Aog>).
- o Oleh karena itu, saya percaya bahwa melibatkan aktor lokal (yaitu, MexFlux) dalam buku putih ini akan sangat berharga, karena mereka akan diakui dan dapat meningkatkan kolaborasi.

Ini adalah komentar berharga yang akan dipertimbangkan jika kami terpilih untuk mengembangkan rencana operasional terutama yang berkaitan dengan para peneliti aktif di MexFlux dan lokasi hutan lembab. Kami mencatat bahwa hutan kering berada di luar cakupan PANGEA.

- Kelemahan dari pendekatan data terbuka yang mendekati waktu nyata: Pembagian data terbuka dalam konteks penelitian ilmu pengetahuan sistem bumi hanya berguna jika hal tersebut berarti pertukaran data pengamatan secara real-time dan tidak terbatas. Jenis pembagian data lainnya yang tetap dibatasi hanya untuk anggota PANGEA atau yang membutuhkan jeda waktu yang lama untuk berbagi data tidak akan dapat memberikan manfaat yang diklaim dalam proposal ini. NASA sangat menyadari manfaat dari berbagi data terbuka secara global dan real-time, karena berkat hal tersebut kami dapat merevolusi prakiraan cuaca dan sepenuhnya memanfaatkan kekuatan penginderaan jarak jauh untuk prediksi cuaca. Terobosan prediksi cuaca tidak akan dapat dicapai tanpa komitmen global untuk berbagi data cuaca secara real-time (lihat Resolusi Kebijakan Data Terpadu Organisasi Meteorologi Dunia). Prinsip yang sama berlaku untuk informasi iklim dan siklus karbon yang dapat ditindaklanjuti di daerah tropis (tepat waktu, rutin). PANGEA harus menunjukkan proposal perubahan paradigma yang lebih eksplisit mengenai pembagian data yang "nyata" dan tidak takut dengan diskusi ini. Tanpa pembagian data secara real-time dan bebas dan tidak terbatas sebagai prinsip utama PANAGEA, potensinya untuk mentransformasi penelitian di daerah tropis dengan memanfaatkan misi NASA akan tetap menjadi ilusi.

Ada beberapa aplikasi yang membutuhkan data yang harus tersedia secara real-time atau hampir real-time seperti prakiraan cuaca. Namun, hal tersebut tidak berlaku untuk semua analisis. Sulit untuk membuat argumen untuk data yang mendekati waktu nyata ketika pokok bahasannya adalah variabilitas antar-tahunan atau antardekade dalam fluks karbon ekosistem. PANGEA berkomitmen terhadap prinsip-prinsip NASA Open Science dan akan memberikan data secara terbuka secepat mungkin dengan batasan biaya yang masuk akal. Kelambatan dalam berbagi data akan diminimalkan, tetapi memberlakukan kriteria hampir seketika atau waktu nyata untuk semua data tidak mungkin dilakukan.

- Pendekatan yang "naif" terhadap tantangan bekerja di daerah tropis: Proposal ini menyinggung tantangan dalam mengamati daerah tropis, namun secara lemah dan naif menjelaskan bagaimana PANGEA akan mengatasi tantangan tersebut. Ada alasan mengapa pengamatan terestrial hutan tropis masih terbatas. PANGEA tampaknya memahami alasan-alasan tersebut namun tidak menjelaskan bagaimana tantangan-tantangan tersebut akan diatasi. Menyatakan dalam Bagian 7.6 bahwa PANGEA akan menggunakan "MOU" untuk mengatasi kesulitan kampanye pengamatan di daerah tropis tampaknya merupakan pemahaman yang naif tentang besarnya tantangan di sana. Proposal ini membutuhkan pendekatan dan definisi yang lebih kuat mengenai langkah-langkah penting yang akan diterapkan PANGEA untuk mengatasi gangguan fisik, operasional, dan sosio-ekonomi, yang

sangat mungkin terjadi di tempat-tempat di mana PANGEA akan beroperasi. Keterlibatan lembaga pemerintah yang sebenarnya (tidak hanya lembaga penelitian) dari domain inti PANGEA tampaknya cukup lemah. Tanpa komitmen yang jelas dari negara-negara dan pemerintah mereka, mencapai jaringan pengamatan yang fungsional dan berkelanjutan di tempat-tempat seperti Lembah Kongo atau Amazon tampak seperti program berisiko tinggi yang mungkin tidak akan didanai oleh NASA jika jaminan yang tepat tidak diterapkan di awal konsepsi program.

NASA memiliki pengalaman yang luas dalam kerja sama ilmiah internasional. NASA merupakan peserta utama dalam LBA yang memiliki kesuksesan besar dalam penemuan ilmiah, dalam memperkuat ilmu pengetahuan Brasil melalui pengembangan sumber daya manusia, dan dalam membangun kepercayaan dan hubungan jangka panjang di antara para peneliti yang bertahan hingga hari ini. Fokus pada satu kalimat mengenai MOU (yang diperlukan untuk kampanye udara) mengabaikan sejarah penelitian NASA di hutan tropis dan proses yang dilakukan PANGEA untuk membangun dialog yang inklusif (lihat *Bagian 8* mengenai pelibatan masyarakat). Harus diakui, operasi di negara tropis dengan kapasitas tata kelola dan infrastruktur yang terbatas merupakan tantangan tersendiri. Kami tidak menyangkal tantangan-tantangan tersebut, namun pemberi komentar mungkin tidak mengetahui keberhasilan NASA dan mitra-mitra mereka sebelumnya sehingga kemungkinan keberhasilan PANGEA menjadi masuk akal.

- Jalan menuju aksi: Jelas bahwa PANAGEA adalah sebuah proposal penelitian. Namun, bagian Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Bertindak dan pilar ketiga PANAGEA mengenai jalan menuju tindakan terlihat lemah dan tidak berhubungan dengan proses multilateral yang paling relevan saat ini untuk tindakan global terhadap perubahan iklim dan pengamatan bumi. Uraian mengenai organisasi-organisasi yang relevan di *Bagian 7* (Tabel 5) dan *8* terlihat agak acak. Tampaknya tidak mencerminkan hasil dari latihan tinjauan sistematis untuk memahami lanskap global organisasi yang bekerja untuk meningkatkan pengamatan bumi di daerah tropis. Organisasi-organisasi utama Perserikatan Bangsa-Bangsa seperti Organisasi Meteorologi Dunia (yang saat ini memimpin pengembangan Global Green House Gas Watch) dan Organisasi Pangan dan Pertanian (pemain kunci dalam pengelolaan lahan dan investasi penggunaan lahan di daerah tropis) tidak ada. UNFCCC hampir tidak disebutkan (disebutkan dalam bagian yang tidak terlalu relevan dengan apa yang dilakukan oleh organisasi ini) meskipun organisasi ini merupakan organisasi yang paling penting yang membutuhkan hasil ilmiah dari PANGEA untuk menginformasikan komitmen global dalam mitigasi iklim dan anggaran karbon.

Komentar tersebut membuat poin yang sangat bagus. Draf bagian Ilmu Pengetahuan Bumi untuk Aksi terlalu umum. Bagian ini (*Bagian 9*) telah disunting secara substansial. Bagian ini sekarang membahas strategi yang lebih holistik dengan lebih rinci.

- Di bagian awal, tidak ada masalah yang mencolok di sini, jadi anggaplah poin-poin ini kecil. Pada bagian yang menguraikan siklus biogeokimia, satu-satunya siklus yang benar-benar dipertimbangkan adalah karbon - hanya dengan fokus pada CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub> terutama. Namun, pada bagian berikut, gambar yang dipetakan dari salah satu makalah Dana Chadwick disajikan untuk menunjukkan konsentrasi Ca dan lain-lain yang dipetakan di kanopi (diambil dari citra hiperspektral yang menurut saya telah dikorelasikan dengan kandungan hara daun). Di sini

ada ruang untuk memasukkan siklus N dan P yang mungkin dapat menambah proyek ini - terutama mengingat perpindahan yang terjadi antara pergerakan P di atmosfer (debu dari Sahara, saya yakin) yang tertiuap angin ke Amerika. Namun, saya tidak mengetahui seberapa besar dampaknya terhadap Amazon secara langsung karena hal ini merupakan pertimbangan yang lebih besar untuk wilayah Yucatan dan transfer dari Afrika datang jauh ke utara wilayah hutan di Afrika. Namun, ada beberapa cara untuk mempertimbangkan biogeokimia tambahan di luar C. Saya sepenuhnya mengakui bahwa hal itu akan membutuhkan pengambilan sampel terestrial yang jauh lebih besar dan pendekatan penginderaan jauh untuk mengukur estimasi tersebut terbatas atau rentan terhadap kesalahan yang tinggi.

Pengamatan tentang draf Buku Putih ini benar. Dan kami telah mengambil tindakan untuk memasukkan diskusi tentang siklus biogeokimia lainnya dalam dokumen yang telah direvisi dengan perhatian khusus pada nitrogen dan fosfor.

- Bagian gangguan menyajikan dikotomi gangguan alami vs gangguan yang disebabkan oleh manusia. Pertimbangkan peran kekeringan dalam meningkatkan potensi kebakaran oleh manusia (misalnya, kekeringan mengeringkan kawasan hutan, menciptakan kemungkinan lebih besar bagi manusia untuk membakar kawasan tersebut untuk membuka lahan karena peluang keberhasilan mereka lebih tinggi). hal ini telah diamati di Amazon, meskipun referensi langsung luput dari saya. Bagian ini tidak sepenuhnya mempertimbangkan dinamika gangguan. Tapi mungkin itu karena dinamika tersebut kurang dipahami dengan baik di Afrika, yang akan menjadi nilai tambah untuk proyek ini karena kita mungkin akan mengetahuinya! - Data ICESat-2 dapat digunakan untuk menambahkan data struktural tambahan untuk hutan di wilayah tersebut - saya melihatnya di Tabel 2, jadi saya tahu bahwa data tersebut ada di "radar" (saya pribadi yang ada di sana!)

Gangguan alami dan gangguan langsung dari manusia dipisahkan untuk kejelasan penjelasan. Namun demikian, interaksi antara iklim dan kebakaran telah diakui dengan baik. Sebagai contoh, interaksi antara suhu tinggi, kekeringan dan kebakaran merupakan fokus yang signifikan dalam pembahasan ilmu pengetahuan PANGAEA (misalnya, Q26).

- Hal ini berada di luar cakupan studi PANGAEA mengingat cakupan panggilan NASA, tetapi memahami proses di bawah tanah - nutrisi, dinamika karbon, biomassa tanaman dan alokasi PLTN untuk akar, enzim, eksudat dan simbiosis - penting untuk memahami proses-proses yang mengatur hutan tropis. Saya menyebutkan hal ini bukan sebagai kritik terhadap PANGAEA, tetapi sebagai komentar terhadap cakupan panggilan NASA secara lebih luas.

Kami menghargai bahwa pemberi komentar menyadari bahwa NASA juga memiliki keterbatasan.

- Bagi kami, hutan tropis di Asia Tenggara tampaknya tidak termasuk dalam studi PANGAEA, padahal kita berbicara tentang ekosistem hutan tropis dan meningkatkan pemahaman kita tentang bagaimana ekosistem tersebut berfungsi. Mungkin masalah anggaran, strategis atau geopolitik tampaknya ikut berperan di sini, namun kami percaya bahwa dengan memperhitungkan semua wilayah hutan tropis akan memungkinkan kami untuk mendapatkan hasil yang lebih holistik dan melakukan pemodelan yang mempengaruhi semua ekosistem hutan tropis.

- Daerah tropis kering sering diabaikan, padahal daerah ini memiliki potensi yang sama pentingnya dengan daerah tropis basah bagi masa depan siklus karbon terestrial, namun masih kurang dipelajari dan kurang dipahami dengan baik.

Keterbatasan sumber daya tidak memungkinkan kami untuk melakukan kampanye lapangan di semua wilayah tropis. Lihat *Bagian 1.4* tentang domain PANGEA. Kami memasukkan domain yang lebih luas dari hutan lembab pantropis, area yang lebih luas dari kepentingan ilmiah, di mana proyek-proyek tambahan dapat dilakukan melalui kemitraan, dan di mana analisis satelit dan pemodelan akan ditekankan. Kami tidak tahu pasti wilayah mana yang dimaksud oleh pemberi komentar yang termasuk dalam wilayah tropis kering, namun kami telah membuat argumen mengenai pentingnya hutan lembab. Sebagai contoh, tampaknya tidak mungkin ada bioma tropis lain yang memiliki peran penting bagi karbon seperti halnya hutan lembab.

- Harap pertimbangkan identifikasi pendorong yang harus dilengkapi dengan kesenjangan utama yang teridentifikasi (lihat baris 426-427) halaman 55 / 61

Baik nomor halaman maupun nomor baris tampak konsisten dengan teks komentar. Kami tidak dapat membalas komentar ini.

**Q3. Seberapa jelas dan mudah dimengerti keseluruhan struktur dan isi laporan studi pelingkupan PANGEA? Mohon berikan contoh spesifik bagian/konsep yang tidak jelas. Mohon cantumkan nomor halaman/baris yang sesuai.**

- Tidak jelas bagi saya proses pengumpulan data dan hubungan antara ilmuwan di Amerika Serikat dan masyarakat di Amerika Latin dan Afrika
- Dari hasil pembacaan saya, hal ini jelas dan dapat dimengerti. Yang tidak jelas bagi saya adalah bagaimana kita (non-Amerika) dapat mengajukan proyek ke NASA.

PANGEA adalah proyek kolaboratif di mana para peserta dari Amerika Serikat akan bekerja sama dengan para peserta dari negara-negara tropis sebagai mitra yang setara. NASA hanya dapat mendukung penelitian di lembaga-lembaga Amerika Serikat. Namun, seperti halnya di LBA, kami akan berusaha untuk menggandengkan penelitian NASA dengan mitra lokal yang dapat mengakses pendanaan lokal. Selain itu, kami akan secara aktif mencari pendanaan bersama dari organisasi swasta yang saat ini sangat aktif mendanai penelitian lingkungan (*Bagian 10.2*).

- Tujuan 1: Mengkarakterisasi dan mengukur respon hutan tropis yang heterogen terhadap perubahan antropogenik. Bagaimana dengan respon hutan tropis terhadap gangguan alam dan iklim (misalnya topan/angin topan, kekeringan, banjir, tanah longsor, dan lain-lain)?

*Bagian 2.5* mengenai dinamika gangguan telah direvisi secara substansial. Kami sekarang tidak hanya menangani gangguan antropogenik tetapi juga gangguan alami melalui mekanisme yang tercantum.

- Struktur dan isi dari laporan studi pelingkupan PANGEA sangat jelas. Sebagai contoh pada Halaman 96, baris 1954-1956, kami memahami dengan jelas bahwa PANGEA akan menjelaskan pola-pola perubahan yang terjadi baru-baru ini (5-30 tahun) dan yang sedang

berlangsung pada hutan tropis, bentang alam, dinamika dan umpan balik, serta variasi geografisnya, dengan pendekatan lingkungan. Penekanan diberikan pada perbandingan antara Amerika dan Afrika.

- *C'est la prise en compte de la dynamique social des communautés local a la base.* [Hal ini mempertimbangkan dinamika sosial masyarakat lokal di pangkalan].

Tidak ada balasan untuk komentar ini.

- Salah satu aspek dari laporan tersebut yang tampak tidak jelas adalah hasil yang diharapkan terkait "Pemetaan dan kuantifikasi prediksi fluks metana" dari studi tentang Stabilitas Penyerapan Karbon dan Fluks Metana (halaman 108). Sementara bagian lain dari proyek ini tampaknya berfokus pada analisis saat ini, penyertaan analisis peramalan tampaknya berada di luar cakupan. Mengingat bahwa PANGEA akan mengumpulkan data hingga akhir kampanye, waktu yang tersedia untuk melakukan analisis prakiraan seperti itu tampaknya terbatas.

Buku Putih telah direvisi secara substansial dan proyeksi masa depan tidak keluar dari ruang lingkup (*Bagian 3.3*). Sebagai contoh, isu stabilitas penyerapan karbon merupakan inti dari salah satu pertanyaan ilmiah proyeksi kami (misalnya, Q25. Dalam iklim yang berubah, jenis hutan yang secara fungsional berbeda mana yang paling rentan untuk menjadi sumber karbon ke atmosfer dalam iklim yang berubah, jenis hutan mana yang tahan, dan mengapa?)

- Menurut pendapat saya, tidak ada kesalahpahaman khusus mengenai keseluruhan struktur dan isinya. Saya mengikuti banyak komunikasi mengenai laporan studi pelingkupan PANGEA ini.
- Laporan ini komprehensif dan terorganisir dengan baik. Bagian pendahuluan dengan jelas menjelaskan mengapa kampanye ini penting dan tepat waktu. Kesenjangan pengetahuan dan pertanyaan-pertanyaan diartikulasikan dengan baik dan akan berfungsi sebagai peta jalan untuk penelitian di masa depan. Laporan ini juga mengidentifikasi misi satelit dan produk data yang sangat penting untuk menjawab pertanyaan penelitian kampanye PANGEA.
- Bagi saya, jadwal yang diberikan cukup jelas dan ketidakstabilan politik (2425) telah diatasi dengan baik, dan Kotak 1 memaparkan rencana lanjutan yang beralasan untuk memulai PANGEA dengan mitra internasional. Saya kurang begitu akrab dengan studi pelingkupan yang tidak dimaksudkan untuk menggambarkan rincian tingkat lokasi tertentu dan merasa bahwa rencana yang dituliskan cukup beralasan dan fleksibel untuk semua peluang berbeda yang akan dihadirkan oleh proyek yang didanai.

Tidak ada balasan untuk komentar ini.

- Secara umum, proyek ini disajikan dengan cukup jelas, tetapi definisi beberapa akronim harus diperiksa sesuai dengan kemunculan pertama kali di dalam teks. (misalnya, definisi produktivitas primer bruto GPP muncul pada Gambar 3, tetapi akronim ini sebelumnya digunakan pada Gambar 1). Saran saya adalah bahwa definisi dari semua akronim, bahkan yang sederhana bagi orang-orang di lapangan, harus dimasukkan ke dalam teks ketika pertama kali digunakan di setiap halaman agar lebih mudah dibaca oleh orang-orang dari bidang lain.

Semua akronim sekarang didefinisikan saat pertama kali disebutkan, dan kami telah menyertakan daftar definisi akronim (*Bagian 14*).

- Keseluruhan strukturnya disusun dengan sangat baik dan isinya secara keseluruhan jelas. Beberapa masalah yang saya perhatikan saat membaca dokumen tersebut adalah: 1) pengamatan fluks metana dan dasar pemikirannya tampaknya merupakan tambahan satu jam terakhir. Ini adalah tambahan yang penting, tetapi tidak termasuk Pangala dkk. 2017 di baris 119, bagian tentang fluks metana pada 1321-1335 harus dimasukkan ke dalam Bagian 2.1.

Komentar tersebut benar dan bagian tersebut telah ditulis ulang dan diintegrasikan dengan lebih baik (*Bagian 2.1. dan 3.1.1*).

- Bagian 2.4 bagian sistem sosio-ekologi sangat berbeda dengan bagian 2.x lainnya. Bagian ini memiliki lebih banyak pernyataan mengenai apa yang akan dilakukan PANGEA (1061-1069; 1090-1093 1161-1163), bagian ini juga akan mendapat manfaat dari studi Levis dkk. 2017 (Science 355, 925-931) mengenai pengaruh masyarakat Pra-Kolombia terhadap kelimpahan dan distribusi pohon. Kemudian, konsep 'hutan budaya' dimunculkan, yang mana Levis et al. akan sangat tepat untuk itu. Pada 2.4, paragraf 1095-1115 memiliki blok referensi yang besar, yang akan lebih baik jika dipisahkan berdasarkan kekuatan atau dampak yang berbeda yang dirujuk.

*Bagian 2.4* telah direvisi secara menyeluruh agar konsisten dengan bagian 2.x lainnya. Perspektif Levis dan koleganya sangat penting dan kami mengutip tinjauan terbaru mereka (2024) yang merangkum sebagian besar pekerjaan mereka sebelumnya termasuk studi pengaruh pra-Kolumbus pada kelimpahan dan distribusi pohon.

- Dalam diskusi tentang dampak mamalia besar terhadap distribusi nutrisi (940), sertakan Doughty et al. 2016 PNAS dalam referensi.

Pentingnya megafauna dibahas pada *Bagian 2.2 dan 3.2.1*. Kami mengutip makalah sebelumnya mengenai dampak megafauna oleh Doughty dkk. (2013).

- dalam Disturbance dynamics, baris 1198 pemahaman yang lebih dalam mengenai driver setahu saya tidak ada di Bagian 2.4. Baris 1229 tidak yakin dari mana pernyataan dalam tanda kurung berasal. Baris 1261 siklon tropis memiliki dampak paling besar pada sistem hutan yang terpapar laut/laut. Saya menyarankan untuk menggabungkan paragraf tersebut dengan paragraf yang dimulai pada baris 1227.

Gangguan kini dibahas di *Bagian 2.5*, dan bagian tersebut telah direvisi secara signifikan. Pemahaman mengenai gangguan sebagian tergantung pada sistem sosial-ekologi yang dibahas di *Bagian 2.4*.

- Pada baris 1315 termasuk Saleska et al. 2003, Sains sebagai referensi untuk perubahan kekuatan penyerap karbon. Baris 1402 membahas tentang kovariansi eddy, akan lebih baik jika ada peta lokasi EC dan lokasi GeoTree. Bagian 3 tidak mencantumkan pengalihan curah hujan, pemupukan CO<sub>2</sub> atau eksperimen suhu sementara Q8, Q9, Q19, dan I23 semuanya bergantung pada eksperimen untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini. Satu lokasi di Peru di mana hutannya berbatasan dengan sumber air panas merupakan lokasi yang berpotensi

menarik untuk diteliti (Kullberg dkk., 2023, New Phytologist) guna menentukan dampak peningkatan suhu terhadap spesies pohon dan ketahanan termalnya.

Situs dan lokasi potensial terdaftar sebagai bagian dari lanskap PANGEA yang mencakup studi eddy covariance dan inventarisasi hutan seperti yang ditunjukkan pada tabel di *Bagian 6.2.2*.

Tanggapan PANGEA terhadap Program Ekologi Terrestrial NASA tidak secara eksplisit mempertimbangkan eksperimen ekosistem yang besar. Eksperimen-eksperimen tersebut sangat berharga dan dapat didanai bersama oleh lembaga-lembaga lain atau donor swasta seperti halnya eksperimen kekeringan Seca-Floresta yang dilakukan di Hutan Nasional Tapajos, Brasil yang didukung oleh dana NSF sebagai bagian dari LBA.

- Tolong, baris 1168-1169 dalam kalimat 'Kegiatan PANGEA... perlu diatur... secara efektif'; apakah yang Anda maksudkan adalah 'mengatur' dan bukannya 'mengatur'?

Kami menggunakan kata "mengatur" untuk membedakan aktivitas para pengambil keputusan.

- Proyek ini ditulis dengan sangat baik dan terstruktur.
- Saran umum saya yang pertama adalah menyoroti bahwa proyek ini dibangun di atas pengetahuan yang sudah ada untuk memajukannya. Jadi, daripada bertujuan untuk mengisi kesenjangan pengetahuan, saya akan menggunakan sesuatu seperti "memajukan pengetahuan (atau pemahaman ilmiah)".

Adanya beberapa pengetahuan tentang hutan tropis tidak menafikan adanya kesenjangan dalam pengetahuan tersebut. Kami akan mempertahankan bahasa yang ada saat ini.

- Dua pertanyaan pertama tampak deskriptif. Saya menyarankan untuk menemukan faktor relasional (misalnya, menganalisis hubungan antara X dan Y), seperti yang dilakukan pada pertanyaan 3.

Pertanyaan-pertanyaan tersebut dikembangkan melalui proses yang mendalam yang melibatkan kelompok-kelompok kerja yang besar. Meskipun komentar tersebut valid, kami tidak ingin membuat perubahan pada pertanyaan-pertanyaan tersebut kecuali jika pertanyaan tersebut tidak jelas atau akan menyebabkan studi yang tidak efektif. Kami rasa tidak perlu mengubah Q1 atau Q2.

- Kata "Antroposen" muncul untuk pertama kalinya di pertanyaan 2. Jika Anda menganggap relevan untuk mempertahankannya, saya sarankan untuk memperkenalkan dan menjelaskan konsep ini lebih awal (dengan catatan bahwa ada perdebatan yang cukup sengit mengenai apa arti sebenarnya dari kata tersebut).

Perdebatan ilmiah yang berkaitan dengan Antroposen adalah masalah yang terutama terbatas pada ahli stratigrafi. Kami awalnya menggunakan kata ini dalam konteks sehari-hari sebagai waktu ketika sistem Bumi didominasi oleh manusia. Ada sedikit perdebatan tentang dominasi manusia ini. Namun, kami tidak lagi menggunakan istilah "Antroposen" dalam buku putih ini.

- Tujuan 1-3 tampaknya tidak secara langsung selaras dengan pertanyaan 1-3.

Saat ini terdapat 5 tujuan, 3 pertanyaan transdisipliner yang menguraikan pertanyaan umum dan banyak sub-pertanyaan yang spesifik secara tematis. Kami tidak mengharapkan mereka untuk secara langsung menyelaraskan karena beberapa tujuan berorientasi pada ilmu pengetahuan dan yang lainnya terkait dengan aplikasi dan pelatihan.

- T1) Apakah akan membantu jika interaksi sosial-ekologi dirinci? Selain itu, pertanyaan ini tampaknya agak luas karena membahas banyak variabel yang berbeda.

Lihat *Bagian 2.4* untuk diskusi mengenai interaksi sosial-ekologis.

- Q3) Tidak jelas bagi saya apakah kita berbicara tentang variasi di antara hutan yang berbeda atau variasi waktu di hutan yang sama. Mungkin keduanya, namun saya sarankan untuk memperjelasnya.

Pertanyaan ini telah dimodifikasi untuk kejelasan.

- Q6) Saya sarankan untuk membagi pertanyaan tersebut menjadi dua - meskipun masuk akal, namun pertanyaan ini agak panjang dan sulit untuk diikuti.

Kami memiliki banyak pertanyaan. Karena pertanyaan ini "sangat masuk akal", kami memilih untuk tidak membaginya.

- T9) Saya sarankan untuk i) menentukan benua tropis yang Anda maksud; ii) membagi pertanyaan menjadi dua pertanyaan yang berbeda namun saling terkait.

Seperti yang telah disebutkan di atas, kami memiliki banyak pertanyaan dan kami memilih untuk tidak membaginya lebih lanjut. Kami tidak melihat adanya keuntungan untuk menentukan benua dalam pertanyaan ini.

- T17) Pertanyaan ini tampaknya bersifat deskriptif. Saya akan menyarankan pertanyaan seperti "Sejauh mana dan bagaimana berbagai aktivitas manusia dan praktik pengelolaan mendukung ketahanan penyerap karbon tropis?"

Kami melihat susunan kata yang disarankan untuk pertanyaan ini secara garis besar sama dengan pertanyaan yang dikembangkan melalui proses kelompok kerja kami. Kami tetap menggunakan kata-kata aslinya.

#### **Q4. Seberapa baik studi pelingkupan PANGEA menjawab pertanyaan atau tujuan ilmiah utama?**

- *Terlihat jelas rumusan pertanyaan dan tujuan yang baik untuk dicapai.* [Perumusan pertanyaan dan tujuan yang ingin dicapai terlihat jelas].
- *Ini adalah tentang koleksi perawatan dan analisis data. Ini tentang pengumpulan, pengolahan dan analisis data.* [Ini adalah tentang pengumpulan, pengolahan, dan analisis data].
- Studi pelingkupan PANGEA telah melakukan pekerjaan yang baik dalam menjawab pertanyaan-pertanyaan ilmiah utama. Pertanyaan-pertanyaan ilmiah tersebut muncul setiap kali memikirkan variabel ekologi dan geofisika yang relevan dengan kampanye (hal. 60 hingga

62), saran metode untuk menjawab pertanyaan penelitian (hal. 76 hingga 77), dan aplikasi penelitian (hal. 107 hingga 115).

- Terbaru dan untuk generasi ilmuwan dan non ilmuwan berikutnya.
- Visi untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ilmiah sangat mengesankan.
- Dari sudut pandang saya (fisika iklim), PANGEA mencakup sebagian besar topik utama. Salah satu topik yang saya sarankan untuk dibahas adalah transportasi jarak jauh dari nutrisi penting ke hutan dan bagaimana hal tersebut akan berubah dengan adanya perubahan iklim. Topik penting lainnya adalah bioaerosol; penting dalam pembentukan awan (es), keanekaragaman hayati, transportasi vertikal, dan transportasi jarak jauh.

Pengangkutan nutrisi jarak jauh terutama penting untuk jangka waktu yang sangat panjang. Bioaerosol sangat menarik dan penting untuk pembentukan awan. Kedua topik ini termasuk dalam kategori penelitian yang terkait dengan PANGEA tetapi bukan bagian dari penelitian inti kami. Kami akan berusaha untuk berkolaborasi dengan kelompok-kelompok yang memiliki kekuatan di bidang ini seperti konsorsium INPA- Max Planck ATTO.

- Secara keseluruhan, studi pelingkupan ini menjawab pertanyaan dan tujuan utama dengan baik, meskipun studi pelingkupan ini akan mendapat manfaat dengan menyertakan lokasi-lokasi percobaan di seluruh wilayah tropis untuk menghubungkannya dengan pengamatan satelit.

Tanggapan PANGEA terhadap Program Ekologi Terrestrial NASA tidak secara eksplisit mempertimbangkan eksperimen ekosistem yang besar. Eksperimen-eksperimen tersebut sangat berharga dan dapat didanai bersama oleh lembaga-lembaga lain atau donor swasta seperti halnya eksperimen kekeringan Seca-Floresta yang dilakukan di Hutan Nasional Tapajos, Brasil yang didukung oleh dana NSF sebagai bagian dari LBA.

- Tujuan umum dari studi eksplorasi PANGEA adalah untuk meningkatkan pemahaman kita tentang bagaimana ekosistem hutan tropis berfungsi, dengan membangun studi dan eksperimen yang ada saat ini untuk mengisi kesenjangan data, khususnya di wilayah tropis Afrika. Untuk mencapai hal ini, PANGEA berencana untuk mengumpulkan pengukuran lapangan, khususnya di lokasi-lokasi kandidat di Afrika, untuk mendanai studi doctoral dan Master tentang isu-isu yang berkaitan dengan fungsi ekosistem tropis dalam rangka mengkonfirmasi hipotesis yang telah diajukan, untuk menciptakan kemitraan yang signifikan dengan pemerintah negara-negara tropis dan masyarakat setempat, dan untuk mendapatkan keuntungan dari dukungan keuangan dan logistik dari NASA yang bergengsi, yang semuanya kami yakini sebagai faktor-faktor yang akan membantu proyek PANGEA mencapai tujuannya. Namun demikian, tidak diikutsertakannya wilayah tropis di Asia Tenggara merupakan masalah yang membuat proyeksi global untuk seluruh wilayah hutan tropis menjadi tidak mungkin dilakukan. Hal ini menjadi hambatan bagi proyek PANGEA.

Keterbatasan sumber daya tidak memungkinkan kami untuk melakukan kampanye lapangan di semua wilayah tropis. Lihat *Bagian 1.4* tentang domain PANGEA. Kami menyertakan domain yang lebih luas dari hutan lembab pantropis, yaitu wilayah yang lebih luas yang menjadi perhatian ilmiah, di mana proyek-proyek tambahan dapat dilakukan melalui kemitraan, dan di mana analisis satelit dan pemodelan akan dilakukan.

**Q5. Apakah metodologi dan perangkat yang diusulkan (misalnya, penginderaan jarak jauh, analisis data) sesuai untuk mencapai tujuan studi PANGEA?**

- *Si, muy adecuadas para el estudio PANGEA. [Ya, sangat memadai untuk studi PANGEA].*
- Pengumpulan data rutin pesawat lokal, dan integrasi dengan jaringan global seperti ACTRIS, mempromosikan proposal ARM-DOE untuk membantu memecahkan topik PANGEA tertentu...

*Ini adalah saran-saran yang tampaknya sesuai untuk proposal peneliti. ACTRIS aktif di Eropa dan mungkin tidak aktif di domain PANGEA. Penggunaan fasilitas ARM DOE mungkin sesuai untuk beberapa investigasi. Proposal terpisah untuk DOE akan diperlukan.*

- Terdapat tinjauan menyeluruh terhadap metodologi (Tabel 1 dan 4) yang digunakan penulis untuk menunjukkan jumlah sumber daya yang kita miliki saat ini dan yang belum diterapkan di hutan tropis. PANGEA membuat kasus yang baik ketika menunjukkan bahwa metodologi ini tidak mutlak dan para peneliti harus mendorong batas-batas pemahaman mereka terhadap ilmu pengetahuan.

*Tidak ada balasan untuk komentar ini.*

- Rencana pengamatannya cukup lengkap, namun ada beberapa perbedaan tentang satelit geostasioner yang perlu dijelaskan lebih lanjut. Saya menyukai penyertaan pengamatan satelit geostasioner, yang diposisikan dengan baik untuk mengamati ekosistem tropis karena posisinya di atas khatulistiwa dalam orbit geostasioner dan melakukan pengamatan sub-harian dalam skala waktu beberapa menit hingga puluhan menit, yang membantu memberi informasi kepada kita tentang proses sub-harian sementara pengukuran yang sering dilakukan memungkinkan lebih banyak waktu untuk menemukan periode bebas awan. ABI pada seri GOES-R, terutama GOES-16 dan GOES-19, berada di atas Amerika Selatan dengan pemandangan Amazon yang luar biasa, tetapi Advanced Himawari Imager (AHI) berada di seri Himawari 8/9 di atas Benua Maritim dengan pemandangan terutama Asia Timur, Australasia, dan sekitarnya. Imager pada seri Fengyun-4 dan seri GEO-KOMPSAT-2 juga mengamati Asia Timur. Terdapat sedikit kesenjangan dalam cakupan geostasioner di Afrika Timur jauh, dan MTG-I1 belum ditugaskan untuk METEOSAT-12 meskipun telah terbang selama hampir dua tahun dan akan sangat penting untuk mengamati Afrika. Seperti yang tertulis, AHI tercatat mengamati Amazon (ini perlu dikoreksi). Inisiatif GeoNEX dari NASA sangat penting untuk mensintesis pengamatan terestrial dari satelit geostasioner, dan tidak jelas apakah keahlian mereka akan diintegrasikan (yang sangat saya rekomendasikan; saya juga tidak tahu apakah tim NASA bisa secara eksplisit dimasukkan dalam proyek cakupan NASA). Penting juga untuk dicatat bahwa GOES-R dapat digunakan untuk menyimpulkan GPP dan respirasi ekosistem melalui model-model seperti halnya estimasi fluks karbon berbasis satelit lainnya. Penekanan lebih lanjut pada kemampuannya untuk menyimpulkan radiasi gelombang pendek downwelling sub-harian dan suhu permukaan daratan dapat sangat membantu menjelaskan bagaimana satelit ini menciptakan platform pengamatan real-time yang unik untuk proses sistem bumi yang penting.

*Kami menghargai komentar terperinci mengenai pengamatan geostasioner, tetapi mengingat banyaknya platform satelit dan sensor yang kami bahas dalam Buku Putih, kami tidak dapat*

memanfaatkan semua informasi ini dalam dokumen tersebut. Kami menghargai identifikasi kesalahan mengenai AHL dan hal ini telah diperbaiki.

- Ya, secara keseluruhan metodologi yang digunakan tampaknya sudah tepat, meskipun menurut saya, studi PANGEA tidak menyertakan lokasi-lokasi percobaan untuk menyelidiki lebih lanjut dampak dari pendorong perubahan iklim seperti kekeringan dan pengayaan karbon dioksida serta lokasi-lokasi perubahan tata guna lahan, seperti lokasi-lokasi TMFO (lihat bagian tanggapan pemangku kepentingan/masyarakat). Cakupan ilmiah membahas mengenai dampak perubahan iklim dan saya bertanya-tanya apakah hal tersebut dapat sepenuhnya diatasi hanya dengan studi observasi.

Tanggapan PANGEA terhadap Program Ekologi Terestrial NASA tidak secara eksplisit mempertimbangkan eksperimen ekosistem yang besar. Eksperimen-eksperimen tersebut sangat berharga dan dapat didanai bersama oleh lembaga-lembaga lain atau donor swasta seperti halnya eksperimen kekeringan Seca-Floresta yang dilakukan di Hutan Nasional Tapajos, Brasil yang didukung oleh dana NSF sebagai bagian dari LBA.

- Ruang lingkup studi ini tampaknya cukup komprehensif. Namun, metode dan pengukuran/variabel pengamatan tampaknya masih kurang dalam beberapa hal yang berkaitan dengan peningkatan pemahaman tentang sumber dan penyerap alami di daerah tropis. Sebagai contoh, penggunaan fraksinasi isotop sebagai batasan untuk pemodelan top-down dan bottom-up tidak ada dalam kebutuhan dan metode pengamatan yang diusulkan (hanya sedikit disebutkan dalam Tabel 4). Terdapat bukti kuat bahwa pengumpulan data isotop secara sistematis merupakan pendekatan yang kuat untuk mempartisi sumber-sumber emisi. Itulah sebabnya pengukuran isotop yang stabil di belahan bumi utara telah menjadi komponen kunci dari jaringan pengamatan. Mengingat kendala dan biaya untuk mengumpulkan dan menganalisis data ini di daerah tropis, proposal harus secara eksplisit menyebutkannya sebagai salah satu bidang pengamatan yang akan diperkuat oleh PANGEA.

Kami setuju bahwa metode isotopik dapat memberikan batasan yang kuat untuk mempartisi proses ekosistem. Metode-metode tersebut tercantum di antara metode-metode untuk analisis integratif pada *Bagian 6.3*.

- Saya ingin menyarankan Anda untuk mempertimbangkan beberapa periode tertentu dalam setahun (periode transisi, dari musim kemarau ke musim hujan dan sebaliknya) untuk kegiatan yang dijelaskan pada baris 2112-2113. Karena karakteristik atmosfer yang khas yang mereka miliki. Periode-periode ini di Afrika Barat, terutama di Benin utara adalah periode yang memiliki banyak kesalahpahaman

Buku Putih ini menargetkan periode kampanye intensif pada awal dan akhir musim kemarau yang dapat mencakup masa transisi. Hal ini akan berbeda di setiap wilayah dan dengan demikian mempengaruhi waktu kampanye.

**Q6. Apakah studi PANGEA berhasil mengidentifikasi tantangan atau ketidakpastian utama dalam kampanye lapangan yang diusulkan?**

- Sangat setuju bahwa usulan-usulan tersebut *telah diterima dengan cara yang partisipatif dalam banyak pertemuan* [Saya sangat setuju, karena usulan-usulan tersebut telah diterima dengan cara yang partisipatif dalam banyak pertemuan].
- Ya, saya kira begitu, tetapi multi negara, masing-masing negara dengan prosedur administrasi khusus seperti lisensi untuk pengukuran, pesawat terbang, dll bisa menjadi tantangan.
- Ya, studi ini secara efektif mengidentifikasi tantangan dan ketidakpastian utama, terutama di Bagian 7, yang membahas Kelayakan Teknis dan Logistik. Para penulis membahas beberapa masalah potensial, seperti kerumitan dalam mengelola tim yang besar, dan memberikan solusi untuk menghindari hambatan komunikasi dengan merampingkan struktur organisasi kampanye. Tantangan lain, seperti potensi ketidakterlibatan masyarakat atau masalah pendanaan internasional, juga diakui, dengan strategi seperti rencana pelibatan dan memanfaatkan jaringan untuk pendanaan alternatif yang disarankan sebagai solusi.
- Seperti yang telah disebutkan di tempat lain, saya menemukan catatan mengenai ketidakstabilan politik cukup beralasan.
- Kampanye lapangan yang diusulkan sepenuhnya membahas masalah perubahan iklim dan keanekaragaman hayati, yang keduanya mencakup deforestasi, perubahan penggunaan lahan, kebakaran, kekeringan, dan sebagainya. Perubahan iklim, yang dampaknya menyebabkan banyak kerugian bagi kehidupan manusia dan infrastruktur, antara lain terkait dengan aliran karbon yang terkandung dalam CO<sub>2</sub> dan CH<sub>4</sub>.
- Tantangan utama yang diidentifikasi oleh PANGEA terkait dengan ketidakpastian kualitas respon kawasan hutan tropis terhadap perubahan iklim, yang sebagian besar terkait dengan aliran karbon di atmosfer. Kepastiannya adalah bahwa keragaman bentang alam hutan tropis dan ancaman antropogenik yang dihadapinya tidak dapat dihindari mengarah pada heterogenitas respons dan kerentanan bentang alam tersebut terhadap ancaman antropogenik. Oleh karena itu, memahami fluks karbon di atmosfer dan trennya saat ini dan di masa depan akan menjadi penting untuk pemahaman yang lebih baik mengenai masalah perubahan iklim, yang merupakan tantangan terbesar yang dihadapi umat manusia saat ini. Oleh karena itu, kampanye PANGEA membantu mengidentifikasi tantangan kontemporer terbesar yang dihadapi umat manusia.

Melalui konsultasi ekstensif kami, kami memperoleh banyak kebijaksanaan dan perspektif mengenai tantangan dan ketidakpastian.

**Q7. Bagaimana Anda menilai relevansi desain studi yang diusulkan untuk memajukan pemahaman kita tentang ekosistem terestrial?**

- *Desain ini membahas poin-poin khusus untuk memahami fungsi dan dinamika ekosistem.* [Desain ini membahas poin-poin spesifik untuk memahami fungsi dan dinamika ekosistem].

- PANGEA diperlukan karena kampanye lapangan di hutan tropis memungkinkan para ilmuwan untuk mempelajari kondisi alami bioma tropis dan bagaimana aktivitas manusia mempengaruhi hal tersebut:
  - Memahami keadaan alam seperti bagaimana partikel aerosol terbentuk, tumbuh, dan bergerak di daerah tropis, misalnya debu dari Afrika ke Amerika Selatan;
  - Mengukur dampak manusia seperti polusi dan deforestasi yang bergerak melalui atmosfer dari garis lintang sedang ke daerah tropis;
  - Mengidentifikasi zona kritis yang dianggap sebagai titik kritis untuk emisi terestrial; dan
  - Mengukur dan memvalidasi variabel lahan seperti indeks luas daun (LAI) dan fraksi radiasi aktif fotosintesis yang diserap (FAPAR), yang merupakan variabel pemaksa penting untuk model yang berbeda.
- Tim ini melakukan pekerjaan yang luar biasa dengan menekankan peran besar ekosistem tropis dalam sistem bumi dengan fokus ekstensif pada siklus biogeokimia/hidrologi yang digabungkan, sistem penginderaan yang canggih, dan pertanyaan-pertanyaan kritis yang melampaui batas-batas disiplin ilmu dan geografis.
- Saya menganggap relevansi proposal ini tinggi berdasarkan pendekatan yang digunakan dan pentingnya wilayah tropis terhadap siklus global (dan tentu saja bagaimana wilayah-wilayah ini terancam oleh perubahan iklim).

Tidak ada balasan untuk komentar ini.

- Relevansi dari desain penelitian ini sangat penting bagi pemahaman kita tentang ekosistem darat. Namun, saya pikir ruang lingkup penelitian ini terlalu observasional dan dapat mengambil manfaat dari lokasi percobaan atau mengidentifikasi lokasi yang memiliki kondisi yang sangat spesifik, seperti percobaan 'pemanasan alami' sumber air panas.

Kami sebelumnya telah menjawab komentar serupa mengenai eksperimen, baik yang bersifat artifisial maupun "alami".

- Tujuan PANGEA, yaitu untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang bagaimana ekosistem terestrial berfungsi, merupakan tujuan yang baik dan patut dipuji; dengan tercapainya tujuan ini, maka akan memungkinkan untuk mengembangkan kebijakan yang tepat dalam menghadapi masalah-masalah seperti perubahan iklim dan hilangnya keanekaragaman hayati. PANGEA dirancang secara strategis berdasarkan serangkaian hipotesis yang terkait dengan heterogenitas respon dan kerentanan wilayah tropis terhadap ancaman antropogenik. PANGEA memungkinkan hipotesis-hipotesis tersebut diverifikasi dengan mengkoordinasikan data lapangan, data dari udara, dan data satelit. Kami percaya bahwa hal ini relevan untuk mencapai tujuan PANGEA. Hal yang paling menarik dari PANGEA adalah bahwa PANGEA memusatkan perhatian khusus pada hutan tropis Afrika, dengan mengutamakan pengukuran terestrial dan udara karena adanya kesenjangan besar dalam data dan pengetahuan di wilayah tropis ini. Meskipun ini merupakan orientasi yang baik untuk proyek PANGEA, namun masih bersifat parsial karena tidak memasukkan hutan tropis di Asia Tenggara, yang jika diikutsertakan dalam penelitian ini, maka akan memungkinkan untuk mendapatkan data global dan membuat proyeksi yang lebih global untuk seluruh wilayah

hutan tropis. Menurut Anda, seberapa layak pelaksanaan teknis dan logistik kampanye lapangan yang diusulkan? Pelaksanaan teknis dan logistik dari kampanye lapangan yang diusulkan tampaknya layak karena dua alasan:

- o Pertama, para ilmuwan dari berbagai ilmu pengetahuan manusia dan sosial dari berbagai latar belakang, khususnya dari lanskap hutan tropis, terlibat dalam penelitian ini. Para ilmuwan dari wilayah tropis memiliki keuntungan karena menguasai realitas tentang apa yang terjadi dalam hal gangguan iklim atau konsekuensi dari gangguan ini dan ancaman terhadap keseimbangan biogeokimia dan keanekaragaman hayati lokal. Hal ini merupakan keuntungan dalam hal menjawab pertanyaan ilmiah yang tepat dan mendapatkan informasi yang tepat dari data atau pengukuran yang dikumpulkan di lapangan.
- o Kedua, potensi sponsor dari NASA merupakan aset utama, baik secara finansial maupun logistik, karena PANGAEA tidak akan mengalami kesulitan untuk mendapatkan data yang dapat diandalkan dari pengamatan udara dan satelit NASA. Data ini juga berpotensi berasal dari organisasi lain yang memiliki kapasitas untuk mendapatkan informasi semacam ini. Selain itu, PANGAEA memiliki wilayah studi empiris yang diwakili oleh kawasan hutan tropis, yang sangat penting dalam memerangi perubahan iklim dan perlindungan keanekaragaman hayati. Secara empiris, pilihan wilayah studi ini merupakan faktor penting dalam relevansi proyek PANGAEA.

Kami telah berkomentar sebelumnya tentang penyertaan Asia. Asia tidak dikecualikan: Ini adalah bagian dari domain yang diperluas. PANGAEA tidak mencari sumber daya untuk kampanye di Asia. Kemitraan dengan sponsor lain dapat memperluas pekerjaan PANGAEA ke Asia dengan mengikuti tema dan pendekatan ilmiah yang serupa.

- Merindukan daerah tropis yang kering!

Silakan lihat tanggapan untuk topik ini di atas.

#### **Q8. Menurut Anda, seberapa layak pelaksanaan teknis dan logistik yang diusulkan untuk kampanye lapangan?**

- *Implementasi ini akan memungkinkan validasi informasi lokal dengan metodologi yang sesuai untuk setiap wilayah.* [Implementasi ini akan memungkinkan informasi lokal divalidasi dengan metodologi yang sesuai untuk setiap wilayah].
- Mempertimbangkan jumlah orang yang terlibat dalam kampanye ini membuat pelaksanaannya menjadi layak. Seperti halnya proyek lainnya, kampanye lapangan ini mungkin tidak terbebas dari hambatan dalam pengembangannya, namun hal ini hanya berarti bahwa studi tambahan dalam proposal mungkin tidak diprioritaskan jika tidak menjawab pertanyaan penelitian secara langsung. Sebagai contoh, seperti yang telah disebutkan sebelumnya, analisis peramalan fluks gas mungkin menjadi hal yang sekunder karena penulis mungkin memprioritaskan untuk menyelesaikan proyek pengumpulan data pada akhir kampanye.
- Ada tingkat kerumitan yang tinggi dalam melakukan penelitian lapangan di daerah terpencil dan (seperti yang diuraikan dalam proposal) kekhawatiran yang lebih besar lagi di beberapa bagian Afrika karena ketidakstabilan politik dan sosial di wilayah tersebut. Namun demikian,

saya berpikir bahwa dengan melihat mitra yang terdaftar, keahlian tim yang terlibat... dengan sumber daya yang memadai, hal ini akan sangat mungkin dilakukan. Hal ini akan menjadi tantangan secara logistik, meskipun saya pikir orang-orang yang terlibat dan kemitraan yang diuraikan menunjukkan potensi keberhasilan yang besar.

- Saya adalah seorang ahli ekologi lapangan, jadi saya tidak bisa mengomentari aspek penginderaan jauh, tetapi semuanya tampak layak.
- Proyek ini cukup ambisius, baik dari segi ruang lingkup maupun cakupan geografisnya - proyek ini mencakup banyak kawasan hutan di berbagai negara di Brasil dan Amerika Selatan. Namun, pendekatan teknis dan logistik yang digunakan cukup beralasan dan memiliki potensi besar untuk berhasil dalam implementasinya di lapangan.

Tidak ada balasan untuk komentar-komentar ini kecuali untuk menghargai mosi percaya.

- Sebagai seseorang yang berasal dari daerah tropis di Filipina dan pernah bekerja di hutan Amazon, saya berpendapat bahwa tim proyek harus mempertimbangkan aspek keselamatan dari penyebaran infrastruktur/peralatan. Kejadian ekstrem, medan, dan dukungan tenaga kerja juga harus dipertimbangkan. Menara fluks kovariansi eddy yang saya kerjakan di Amazon, selalu mengalami kegagalan instrumen karena gangguan/intrusi satwa liar. Catu daya (terutama panel surya) karena hari berawan merupakan masalah yang signifikan. Keamanan personel dan peralatan sangat penting.

Semua hal tersebut merupakan masalah penting yang tidak menjadi pokok bahasan utama dalam dokumen konseptual kami, namun akan menjadi pertimbangan yang kuat jika kami terpilih untuk mengembangkan rencana eksperimen operasional. Kami mencatat bahwa kantor proyek NASA memiliki pengalaman yang luas di hutan tropis dan telah menangani masalah-masalah yang serupa dengan yang disebutkan di atas.

- Saya menganggap proposal ini masih cukup terbuka untuk didiskusikan implementasinya, tetapi langkah pertama dari test bed ini sangat penting untuk memberikan momentum. Saya berharap proposal ini juga terbuka untuk orang non-Amerika.

NASA telah melakukan lebih dari sekedar "uji coba" di hutan tropis melalui pengalamannya sebagai bagian dari LBA yang dipimpin oleh Brasil. Pihak non-Amerika dipersilakan untuk berpartisipasi meskipun NASA memiliki keterbatasan dalam mendanai lembaga-lembaga di luar Amerika Serikat. Kami secara aktif mencari pendanaan bersama, seperti yang disebutkan dalam *Bagian 10.2*.

**Q9. Apakah ada potensi hambatan atau tantangan yang belum ditangani secara memadai oleh studi pelingkupan PANGEA?**

- Jika ada hambatan, itu adalah hambatan budaya dan bahasa, karena di wilayah *intervensi* Pangea terdapat keanekaragaman budaya dan bahasa yang harus ditangani dengan sangat penting [Jika ada hambatan, itu adalah hambatan budaya dan bahasa, karena di wilayah Pangea terdapat keanekaragaman budaya dan bahasa yang harus ditangani dengan sangat penting].

Selama proses pelingkupan, PANGEA bekerja untuk mendobrak hambatan. Sebagai contoh, kami mengadakan pertemuan regional dengan penerjemahan simultan. Kami menyediakan draf Buku Putih dalam beberapa bahasa termasuk bahasa Spanyol. Kami telah menjawab komentar-komentar yang masuk mengenai dokumen tersebut dalam bahasa Spanyol dan Perancis. Dokumen Buku Putih kami (termasuk tanggapan-tanggapan tersebut) akan diterjemahkan ke dalam bahasa Spanyol, Prancis, Portugis, dan Indonesia. Tujuan kami adalah untuk melanjutkan praktik-praktik ini untuk meminimalkan hambatan.

- Masalah keamanan beberapa bidang studi.

Keselamatan peserta proyek adalah prioritas utama. Evaluasi keselamatan di lapangan akan menjadi tanggung jawab Kantor Proyek. Lokasi yang berisiko tinggi mungkin perlu dihindari. Lihat *Bagian 10.5* untuk diskusi tentang risiko dan mitigasi risiko.

- Salah satu tantangan potensial yang mungkin belum sepenuhnya ditangani oleh PANGEA adalah kurangnya keterwakilan Asia dalam kelompok cakupan, meskipun studi ini berfokus pada wilayah tropis. Meskipun kelalaian ini mungkin tidak menghalangi pencapaian tujuan proyek secara individual, hal ini dapat menjadi penghalang ketika mencoba untuk menyajikan temuan-temuan kampanye dalam skala global.

Karena keterbatasan sumber daya, kami mencurahkan lebih banyak perhatian pada Afrika dan Amerika daripada Asia. Namun, kami telah melakukan penjangkauan di Asia dan jika didanai, kami akan terus menjangkau untuk menghindari potensi hambatan yang disebutkan dalam komentar yang ditempatkan dengan baik ini.

- Kesenjangan pengetahuan utama yang tidak dibahas dalam studi pelingkupan ini adalah bagaimana konveksi dalam tropis berdampak pada pandangan kita tentang siklus karbon. Model transportasi atmosfer global saat ini memiliki parameterisasi konvektif yang berbeda-beda, dan kita tidak memiliki pemahaman yang jelas mengenai kesalahan atribusi fluks karbon yang disebabkan oleh transportasi vertikal yang tidak terselesaikan dengan baik di daerah tropis (Stephens dkk., 2007). Kemajuan terbaru dalam model penyelesaian awan menunjukkan harapan dalam merepresentasikan konveksi tropis secara akurat dan dampaknya terhadap distribusi pelacak siklus karbon. Hal ini dapat membantu meningkatkan estimasi fluks karbon dari atas ke bawah di daerah tropis. Sistem pemodelan/asimilasi data yang menggabungkan kemajuan terbaru dalam representasi transportasi atmosfer dapat membantu kita menginterpretasikan pengamatan jejak gas secara lebih akurat di berbagai skala untuk meningkatkan pemahaman tentang dinamika karbon tropis.
- Laporan tersebut mengidentifikasi bahwa "fluks dari respirasi, emisi metana, dan aliran karbon lateral, telah terbukti cukup besar di hutan tropis" (baris 1319-1321, halaman 36), namun tidak memberikan rencana konkrit untuk mengukur transportasi karbon lateral di lapangan. Sebaliknya, dinyatakan bahwa "penggenangan dari NISAR dan BIOMASS akan mendukung pemetaan lahan basah hutan tropis dan akan diintegrasikan dengan pengukuran aliran air permukaan dari SWOT, sehingga memungkinkan pengukuran langsung terhadap fluks karbon lateral dari sistem tropis" (baris 1374-1376, halaman 38). Saya bingung bagaimana hal ini dapat dicapai mengingat tidak ada satupun satelit yang disebutkan di atas yang melacak karbon anorganik terlarut atau karbon organik terlarut/terpartikel. Barangkali PACE bisa

membantu? Tetapi pengukuran lapangan masih diperlukan untuk melacak transportasi karbon lateral dan memvalidasi produk dan model data satelit.

#### Referensi

Stephens, B. B., Gurney, KR, Tans, PP, Sweeney, C., Peters, W., Bruhwiler, L., Ciais, P., Ramonet, M., Bousquet, P., Nakazawa, T., Aoki, S., Machida, T., Inoue, G., Vinnichenko, N., Lloyd, J., Jordan, A., Heimann, M., Shibistova, O., Langenfelds, RL,... Denning, AS (2007). Penyerapan Karbon Lahan Tropis Bagian Utara yang Lemah dan yang Kuat dari Profil Vertikal CO Atmosfer<sub>2</sub>. *Science*, 316(5832), 1732-1735.  
<https://doi.org/10.1126/science.1137004>

Peningkatan pemahaman mengenai transportasi atmosfer berada di luar cakupan PANGEA. Penelitian yang diusulkan menggunakan inversi model akan tunduk pada tinjauan sejawat yang harus mengidentifikasi masalah dengan model transportasi yang digunakan.

Mengukur fluks lateral adalah masalah penelitian yang telah kami identifikasi, tetapi kami belum menemukan solusinya.

- Kemungkinan ada isu-isu terperinci yang selalu dapat dipertimbangkan secara lebih rinci, tetapi saya pikir dokumen pelingkupan ini sudah cukup untuk menjawab kekhawatiran pada tahap ini.

Tidak ada balasan untuk komentar ini.

- Perlu menjaga keterlibatan dengan mitra di Afrika dan Amerika Selatan, melakukan hal ini dengan baik adalah sebuah tantangan

Kami sangat setuju. Pada *Bagian 10*, di mana kita membahas organisasi proyek, kami menyebutkan sejumlah mekanisme untuk memfasilitasi interaksi yang sedang berlangsung. Kami telah belajar dari proyek-proyek sebelumnya bahwa kami perlu membangun hubungan interpersonal yang kuat berdasarkan kerja sama yang setara. Hal ini selalu menjadi tantangan bagi semua orang yang terlibat, namun seperti yang kita pelajari selama LBA, hal ini bukanlah sebuah penghalang.

#### **Q10. Menurut Anda, apakah studi PANGEA akan mendorong kemitraan yang berarti dengan para pemangku kepentingan (misalnya, masyarakat lokal, pemerintah)?**

- Hal ini tidak mudah, tetapi dapat ditingkatkan selama bertahun-tahun jika ada pemahaman dari para pemangku kepentingan dan masyarakat setempat... Pesta Natal, dll., tidak akan membuat masyarakat setempat terintegrasi

Kami yakin bahwa pemberi komentar tersebut bersikap ironis. Kami tidak menyebutkan kegiatan seperti pesta Natal. Buku Putih berisi bagian lengkap (*Bagian 8*) tentang pelibatan masyarakat dan kami mengakui tantangan tersebut dan menyajikan strategi untuk menghadapi tantangan tersebut. Kami juga menunjukkan komentar lain yang dikutip di sini mengenai kepercayaan diri yang diperoleh dari rancangan Buku Putih kami, "Rencana untuk melibatkan masyarakat lokal dan pemerintah sejak awal dalam rencana sangat penting dan

saya merasa bahwa rencana tersebut sangat sadar akan semua dinamika yang dapat muncul setelah proyek didanai; ada lebih banyak entitas yang dipertaruhkan dibandingkan dengan ABOVE. "

- Ya, PANGEA dapat membina kemitraan yang berarti dengan para pemangku kepentingan. Namun, seperti yang telah saya katakan, penting untuk mendapatkan komitmen dan keterlibatan pemerintah sejak dini. Sama halnya dengan sektor swasta yang bekerja di sektor kehutanan, misalnya

Kami setuju dengan komentar tersebut. Kami memberikan bukti bahwa kami telah memulai proses pelibatan dalam lampiran kami, termasuk surat dukungan (*Lampiran A*) dan *Lampiran B* dan *C*, yang merinci penjangkauan yang kami lakukan dengan pemerintah dan lembaga lainnya.

- Karena ini adalah kampanye internasional, PANGEA akan menjalin hubungan dengan pemerintah daerah dan LSM berdasarkan topik.
- Ya. Bekerja lebih banyak dengan masyarakat daripada dengan otoritas negara.
- Saya yakin begitu, ya. Wilayah tropis membutuhkan sebanyak mungkin dukungan yang dapat kita berikan, mengingat bahwa dukungan tersebut akan bertahan lama dan bukan basa-basi. Dokumen pelingkupan ini saya rasa sudah cukup membahas hal ini. Saya mendorong tim untuk tetap menghindari "ilmu helikopter" di garis depan pekerjaan mereka (seperti yang telah mereka lakukan di sini).
- PANGEA sangat mengesankan dalam hal bagaimana mereka membentuk kemitraan yang efektif dengan para pemangku kepentingan.
- Ya, saya yakin proyek ini telah berhasil mengumpulkan sekelompok entitas yang sangat berkomitmen. Saya juga percaya bahwa, seiring dengan berjalannya proyek ini, akan lebih banyak lagi orang yang tertarik. Masalah konservasi hutan ini menjadi perhatian universal dan kecenderungannya adalah bahwa kemitraan hanya akan meningkat.
- Ya, karena PANGEA jika didanai akan memberikan solusi bagi beberapa tantangan yang dihadapi oleh para pemangku kepentingan dan pemerintah. Sebagai contoh, di Benin, di Cagar Hutan Lama (Benin Selatan), Mosaik Hutan Tanaman Alami, Terdegradasi, dan Hutan Tanaman Teck yang dikelola oleh badan nasional untuk kayu dan hutan sedang mencari cara untuk memerangi kebakaran hutan secara efisien di musim kemarau. Hal ini menghabiskan banyak populasi pohon dan mungkin mempengaruhi produktivitas perkebunan mereka dan dengan demikian juga ekonomi mereka. Jadi, studi ruang lingkup PANGEA tidak diragukan lagi akan menumbuhkan kemitraan yang berarti dengan para pemangku kepentingan.

Kami menghargai komentar-komentar ini dan tidak memberikan tanggapan langsung.

- Idealnya, namun seperti yang ada saat ini, proposal tersebut sangat tidak jelas dalam menunjukkan bagaimana kemitraan jangka panjang yang berkelanjutan untuk operasi dan pemeliharaan jaringan pengamatan akan bekerja. Menjamin operasi jaringan yang berkelanjutan dengan berbagi data secara real-time merupakan upaya besar di daerah tropis yang membutuhkan dukungan dan komitmen dari semua tingkat pemerintahan nasional, tidak hanya komunitas penelitian. Pengerahan tenaga ahli, komunikasi, dan teknologi dalam domain

PANGEA membutuhkan koordinasi di beberapa aktor di lapangan, tetapi proposal ini tampaknya sangat berfokus pada lembaga penelitian, yang memiliki ruang lingkup terbatas untuk mengatasi tantangan hukum, politik, dan sosio-ekonomi yang akan dihadapi oleh kampanye di lapangan.

Buku Putih ini menyajikan rencana konseptual dan bukan rencana operasional. Banyak isu yang diangkat di sini bersifat operasional. Hal ini dapat menjelaskan karakterisasi rencana tersebut sebagai "samar-samar". Melalui sejarah panjang kampanye termasuk LBA dan ABoVE, kantor proyek NASA telah menunjukkan keberhasilan dalam penyebaran lapangan, pengumpulan data dan berbagi data.

- Semuanya tergantung pada apa yang dilakukan PANGEA untuk mencapai tujuan ini. Sejumlah prasyarat harus dipenuhi sebelum kemitraan ini dapat dilaksanakan, dan menurut saya hal ini sangat penting jika proyek PANGEA ingin mencapai tujuannya. Memang, tanpa dukungan dari masyarakat lokal yang tinggal di lokasi-lokasi kandidat yang diidentifikasi dan dipilih oleh proyek PANGEA, dan yang wilayah komunitasnya dimasukkan dalam penelitian untuk tujuan eksperimental, PANGEA berisiko ditolak oleh populasi ini. Oleh karena itu, perlu dan penting bagi proyek PANGEA untuk melakukan tindakan yang ditargetkan pada populasi ini untuk menjamin dukungan dan penerimaan mereka terhadap proyek PANGEA. Demikian pula, tanpa dukungan dari pemerintah negara-negara tropis, khususnya yang berada di Lembah Kongo, PANGEA tidak akan dapat mencapai tujuannya. Untuk alasan ini, kepatuhan formal dan legal terhadap peraturan perundangan mengenai akses ke wilayah atau bentang alam kandidat tidak akan cukup. Perlu adanya motivasi dan insentif tambahan yang ditujukan langsung kepada masyarakat lokal dan anggota pemerintah untuk mendorong terbentuknya kemitraan yang berarti dengan kedua entitas tersebut. Hal ini akan memastikan kerja sama dan dukungan penuh mereka terhadap tujuan proyek PANGEA.

Membangun hubungan dengan mitra pemerintah dan masyarakat setempat selalu penting. Ini adalah komentar yang berharga.

#### **Q11. Apakah ada pemangku kepentingan atau masyarakat lain yang seharusnya dilibatkan dalam studi PANGEA?**

- *Komunitas petani dan penduduk asli atau lainnya yang berada di wilayah di mana proyek akan dibangun, sudah memiliki pengetahuan leluhur.* [Masyarakat petani dan penduduk asli atau masyarakat lainnya yang berada di wilayah di mana proyek akan dikembangkan, sudah memiliki pengetahuan leluhur].

PANGEA menyatakan ketertarikannya terhadap integrasi pengetahuan masyarakat adat, lokal, dan tradisional dengan penginderaan jarak jauh. Lihat, sebagai contoh, *Bagian 9.1* dari Buku Putih.

- Proyek ini telah mencakup hampir semua pemangku kepentingan yang dibutuhkan untuk proyek ini.
- Tentu saja, tetapi hanya mungkin untuk mengidentifikasi dengan jelas di lapangan. Jadi, proyek ini harus terbuka untuk memperluas cakupannya.

- Sektor swasta, terutama yang bergerak di bidang kehutanan, pertanian, dan pertambangan harus dilibatkan secara kuat.
- Akan lebih baik jika melibatkan masyarakat lokal secara langsung (perwakilan mereka), tanpa melalui pihak berwenang. Untuk menghindari penipuan.
- Mungkin juga merupakan ide yang baik untuk melibatkan jaringan anggota parlemen Afrika, yang sering terlibat dalam konservasi dan pengelolaan ekosistem hutan yang berkelanjutan di Afrika Tengah.

Kami tidak memiliki balasan khusus untuk komentar-komentar ini.

- Saya tidak yakin apakah ini merupakan pilihan untuk memasukkan inisiatif NASA ke dalam ruang lingkup itu sendiri, tetapi tim GeoNEX yang disponsori NASA (<https://www.nasa.gov/nasa-earth-exchange-nex/earth-observations-geonex/data-products/>) telah berperan penting dalam menciptakan dan menyebarkan produk data geostasioner di beberapa satelit.

Kami menyadari pentingnya pengamatan Geostasioner (misalnya, *Bagian 3.1*), tetapi kami tidak secara khusus menyebut GeoNEX. Kami menyadari bahwa kegiatan-kegiatan tersebut memiliki banyak kontribusi terhadap PANGEA.

- Studi sebesar ini harus tetap berpikiran terbuka untuk melibatkan pemangku kepentingan lain yang mungkin hadir, meskipun dari sisi sains saya pikir komunitas sains eksperimental tampaknya terlewatkan. Saya memahami bahwa NASA adalah tentang pengamatan (terutama dari satelit), tetapi tidak menyertakan pengayaan AMAZON FACE CO<sub>2</sub>, eksperimen kekeringan EsecFlor, TmFO (Tropical managed Forest Observatory) untuk gangguan hutan, dan hutan eksperimental Luquillo tampaknya tidak pada tempatnya. Pengamatan satelit yang terfokus pada lokasi-lokasi tersebut dapat membantu menjawab pertanyaan-pertanyaan ilmiah yang ingin dijawab oleh program ini.

Kami telah menjawab pertanyaan sebelumnya mengenai eksperimen ekosistem (lihat di atas).

- Saya rasa akan sangat mungkin untuk menghitung mitra universitas di daerah.

*Lampiran B, C, dan D* mencantumkan daftar mitra-mitra ini.

- World Environmental Conservancy (WEC), sebuah yayasan nirlaba swasta dari Amerika Serikat, dengan senang hati akan terlibat dalam proyek ini. WEC memiliki banyak orang Brasil yang terlibat dalam proyek-proyeknya yang merupakan bagian dari universitas, institut dan entitas Brasil yang kemungkinan akan dengan senang hati memberikan dukungan yang diperlukan di lokasi.

Ini adalah berita yang sangat bagus. PANGEA akan segera menghubungi Anda.

- Saya menyarankan untuk memasukkan hutan dataran tinggi yang dilestarikan (terra firme) di sepanjang PA-370 (km 107) (2°53'7.95 "S; 53°57'37.79 "W). Hutan ini berada di tanah liat dan memiliki keanekaragaman pohon besar yang tinggi seperti kacang Brazil (*Bertholletia excelsa*). Daerah ini merupakan perbatasan pertanian regional yang baru. Ini adalah lanskap yang belum banyak diketahui yang merupakan bagian dari penelitian disertasi saya. Wilayah Curuá-Una yang lebih luas di Santarém memiliki karakteristik perbatasan lama dan baru, yaitu ladang

monokultur yang telah berlangsung puluhan tahun (perbatasan lama) dan deforestasi yang sedang berlangsung untuk perluasan tanaman tunggal (perbatasan baru) (Coelho dkk., 2021; Schielein & Börner, 2018). Wilayah ini berada di Dataran Tinggi Santarém, sebuah dataran tinggi yang luas dan berdekatan dengan pertemuan Sungai Tapajós dan Sungai Amazon (Barros et al., 2020). Melakukan perjalanan dari Santarém menuju Uruará melalui jalan raya PA-370, kita dapat melihat perbedaan mencolok dalam penggunaan lahan dan konservasi hutan antara area sebelum dan sesudah bendungan PLTA Curuá-Una. Sebelum bendungan, terdapat area yang telah lama digunakan untuk tujuan pertanian (mulai tahun 1960-an), dengan dominasi ladang monokultur berskala besar (kedelai/jagung). Setelah bendungan, penggunaan lahan jauh lebih baru (mulai tahun 2010-an) dan tutupan hutan jauh lebih tinggi. Keberadaan area dengan waktu pendudukan yang berbeda memungkinkan analisis penggunaan lahan secara temporal, yang dapat menjadi lensa yang berguna untuk memahami heterogenitas dalam dinamika hutan. Saya percaya bahwa memasukkan lanskap ini akan memberikan i) data yang menarik untuk dibandingkan dengan Hutan Nasional Tapajós yang telah dipelajari dengan baik (km 67 dari BR-163), dan ii) wawasan yang berguna untuk memahami lanskap hutan tropis. Saya memiliki kemitraan dengan masyarakat lokal di wilayah ini (Asosiasi Petani Aprocad), sebuah koperasi petani kecil (COOPBOA - Koperasi Petani Keluarga Komunitas Boa Esperança), dan para akademisi lokal di Universitas Federal Pará (UFOPA), di Santarém - Dr. Tiago Vieira, Dr. Helionora Alves, Dr. Diego Amoedo - dan Universitas Federal Pará Barat (UFPA), di Belem - Dr. Valério Gomes, Dr. Raquel Santos, dan Dr. Katiane Silva.

[Ini adalah saran yang sangat baik untuk perluasan lanskap potensial di dekat Santarem. Ini memberikan area yang kaya untuk dibandingkan dengan BR-163.](#)

- Di Kolombia, saya sarankan untuk memasukkan komunitas El Caraño (01°44'47.1" N, 075°41'35.9" W), yang terletak di lereng timur punggung Andes Timur, di antara ekosistem Andes dan Amazon di Florencia, Caquetá. Andes tropis adalah salah satu daerah yang paling beragam secara biologis di dunia dalam hal kekayaan spesies dan endemisme. Tingginya tingkat keanekaragaman hayati sering dikaitkan dengan karakteristik dan perubahan lanskap dari waktu ke waktu (Moritz dkk. 2000; Trénel dkk. 2008; Sarkinen dkk. 2012). Hutan Awan Montana Tropis Andes (Andean Tropical Montane Cloud Forest/TMCF) merupakan ekosistem tropis Andes yang memainkan peran penting dalam siklus air lokal dan regional (Aldrich dkk. 1997; Fahey dkk. 2016). Namun, perluasan pertanian dan urbanisasi menyebabkan banyak deforestasi di kawasan TMCF (Etter & Wyngaarden 2000; Armenteras et al. 2003). Akibatnya, ekosistem ini menjadi sangat terfragmentasi (Aldrich et al. 1997; Brummitt & Lughadha 2003; Gotsch et al. 2015). Karakteristik hutan awan di wilayah ini luar biasa karena tingginya kehadiran keluarga Arecaceae, dengan 24 marga dan 109 spesies palem (Borchsenius & Moraes 2006). Saya juga memiliki mitra di Kolombia yang dapat memberikan kontribusi besar pada proyek ini: Oscar Perdomo (Profesor Penuh di Universitas Boyacá) dan Edwin Trujillo (Profesor di Universitas Amazon).

[Lingkungan pegunungan tidak diragukan lagi penting, namun kami memutuskan untuk tidak memasukkannya ke dalam PANGEA karena lingkungan ini mencakup area yang sangat kecil dibandingkan dengan dataran rendah dan membutuhkan pengambilan sampel yang spesifik dan terperinci untuk memperhitungkan heterogenitas karakteristik topografi dan edafik, yang](#)

karena sumber dayanya terbatas akan membatasi pengambilan sampel di gradien berskala besar lainnya.

**Q12. Apakah ada area di mana pendekatan terhadap keragaman dan inklusi dapat ditingkatkan?**

- *Si, en comunidades establecidas en el ámbito del bosque, ya que ellos son lo que hacen uso directo del bosque o ecosistema. [Ya, pada masyarakat yang didirikan di kawasan hutan, karena merekalah yang memanfaatkan hutan atau ekosistem secara langsung].*
- *Pendekatan yang didasarkan pada dinamika sosial, pemahaman tentang gémi lokal dari komunitas lokal di tingkat basis, implikasi dari komunitas lokal dalam pengambilan keputusan, pemahaman tentang aspek perlindungan transversal, inklusi sosial, perlawanan terhadap kekerasan yang didasarkan pada Genre, implikasi ONG nasional dalam pelaksanaan kegiatan, penguatan kapasitas komunitas lokal di tingkat dasar, pembentukan profesional dan teknik, dukungan untuk ketahanan komunitas lokal di tingkat dasar, dukungan untuk pembangunan ekonomi sosial dan ketahanan, mobilisasi komunitas. [Pendekatan berdasarkan dinamika sosial, dengan mempertimbangkan keluhan lokal masyarakat lokal di akar rumput, keterlibatan masyarakat lokal dalam pengambilan keputusan, dengan mempertimbangkan aspek perlindungan lintas sektoral, inklusi sosial, perlawanan terhadap kekerasan berbasis gender, keterlibatan LSM nasional dalam pelaksanaan kegiatan, peningkatan kapasitas masyarakat lokal di akar rumput, pelatihan kejuruan dan teknis, dukungan terhadap ketahanan masyarakat lokal di akar rumput, dukungan terhadap pembangunan ekonomi sosial dan berkelanjutan, mobilisasi masyarakat].*

Bekerja sama dengan masyarakat setempat akan membutuhkan kemitraan lokal yang kuat. Lihat *Bagian 8* dari Buku Putih ini untuk mengetahui strategi kami, yang telah direvisi secara substansial dari draf pertama.

- Proyek ini mengartikulasikan hubungan yang baik dengan masyarakat adat dan lokal, dan saya tahu bahwa hal ini belum tentu berada dalam cakupan NASA, tetapi menghubungkan temuan-temuan dengan masyarakat yang kurang terlayani di AS dapat lebih meningkatkan hasil, membantu melatih generasi ilmuwan AS berikutnya, dan meningkatkan masa depan kolaborasi internasional.

Salah satu bidang di mana PANGEA dapat terhubung dengan masyarakat AS yang kurang terlayani adalah melalui pengembangan tenaga kerja. Hal ini dapat dilakukan melalui partisipasi dalam program Riset, Inovasi, Sinergi, dan Pendidikan (RISE) NSF dan Geoscience Opportunities for Leadership in Diversity (GOLD-EN) (*Bagian 7.1*).

- Sepengetahuan saya tidak. Tim ini telah melakukan pekerjaan yang luar biasa dan menggunakan metodologi yang telah teruji untuk menjadi inklusif.

Tidak ada balasan untuk komentar ini kecuali kami sangat menyukainya.

**Q13. Apakah Anda memiliki saran atau masukan tambahan untuk kampanye lapangan PANGEA yang diusulkan?**

- *Ini adalah kesempatan yang brilian untuk melestarikan dan mengelola secara berkelanjutan ekosistem tropis.* [Ini adalah kesempatan yang brilian untuk melestarikan dan mengelola ekosistem tropis secara berkelanjutan].
- *Kami ingin menandatangani perjanjian kemitraan dengan institusi Anda, bekerja sama dengan Anda dalam kemitraan konsorsium, mendapatkan bantuan teknis, dukungan finansial, peralatan logistik untuk pelaksanaan proyek.* [Kami ingin menandatangani perjanjian kemitraan kerangka kerja dengan institusi Anda, bekerja sama dengan Anda dalam kemitraan konsorsium, mendapatkan keuntungan dari bantuan teknis, dukungan keuangan, peralatan logistik untuk pelaksanaan proyek].
- Komunikasi yang lebih baik seputar kampanye.
- Menyediakan banyak waktu dan sumber daya untuk kerja lapangan, menurut saya; akan lebih menantang, terutama di Afrika.

Tidak ada balasan untuk komentar ini.

- Jika didanai, ciptakan ruang untuk kolaborasi/kolaborator dari luar untuk membantu menambah dan memperluas pekerjaan. Kembangkan infrastruktur yang tahan lama di wilayah studi. Dan juga ketahuilah bahwa Anda telah menyusun dokumen pelingkupan/proposal yang bagus di sini. Sangat menyenangkan untuk dibaca!

Kolaborasi dengan pihak luar akan menjadi bagian penting dari keberhasilan PANGEA (lihat *Bagian 8 dan 10.2*). Sejarah menunjukkan bahwa meskipun pengembangan infrastruktur penting, namun jauh lebih penting untuk mengembangkan sumber daya manusia. Kami akan melakukan apa yang kami bisa untuk mempromosikan keduanya seperti yang dijelaskan dalam Buku Putih, tetapi sumber daya manusia akan menjadi prioritas kami.

- Saya akan sangat senang jika Anda dapat mempertimbangkan dua lanskap hutan tropis yang terletak di Benin sebagai kandidat untuk studi pelingkupan ini. Keduanya cocok dan memenuhi semua rincian yang diberikan dalam buku putih (aksesibilitas, setidaknya 100km<sup>2</sup>; ketersediaan menara fluks; dll.).
  - o Yang pertama - Bellefoungou (9.79115 N; 1.718 E) didirikan di atas hutan yang bersih dengan kovarian eddy energi, uap air dan fluks karbon dioksida, pengukuran tanah dan cuaca, survei geofisika. Bellefoungou beroperasi sejak 06/2008 hingga hari ini sehingga data fluks jangka panjang tersedia.
  - o Yang kedua - Cagar Alam Hutan Lama (6.57360N; 2.10480E). Situs kovarians eddy akan dipasang pada tahun 2025 di atas Mosaik Hutan Alam, Hutan yang Terdegradasi dan Hutan Tanaman (*Tectona grandis* dan *Senna siamea*). Cagar Alam Hutan Lama dikenal di seluruh dunia dan telah dipelajari sejak lama. Luasnya diperkirakan mencapai 16.250 ha dan mudah diakses. Gangguan antropogenik yang dikombinasikan dengan perubahan iklim mempengaruhi kondisi pertumbuhan di lanskap ini dan memodifikasi parameter demografi seperti perkecambahan, pertumbuhan semai dan pancang serta tingkat kematian.

Lokasi-lokasi di Benin ini termasuk di antara lokasi-lokasi kandidat studi dalam 6.2.2.

## G. Topik di luar Lingkup PANGEA

Meskipun PANGEA bersifat ambisius dan integratif, terdapat beberapa topik yang ditentukan berada di luar cakupan oleh Kelompok Kerja dan kepemimpinan PANGEA. Topik-topik tersebut tercantum dalam Tabel G-1.

<b>Tabel G-1.</b> Item, topik, dan pertanyaan yang ditentukan berada di luar cakupan PANGEA	
<b>ITEM/TOPIK/PERTANYAAN DIKECUALIKAN</b>	<b>MENGAPA</b>
<b>BAGAIMANA CADANGAN KARBON TANAH BERUBAH?</b>	Tidak ada hubungan langsung dengan penginderaan jauh, dan mineralogi lebih penting daripada produktivitas dalam mengendalikan cadangan karbon. Menara fluks kovarians eddy tidak dapat memisahkan respirasi autotrofik dari respirasi heterotrofik, dan terdapat terlalu banyak heterogenitas untuk mengukur antara ruang tanah dan menara
<b>NITROGEN OKSIDA (N<sub>2</sub> O)</b>	Hutan tropis merupakan sumber global yang penting bagi N <sub>2</sub> O. Namun, karena masa hidup N <sub>2</sub> O di troposfer yang sangat panjang, sulit untuk mengukur sumber dan penyerap regional dan lokal dengan menggunakan teknik yang bergantung pada pengambilan sampel di atmosfer seperti inversi fluks dan kovarian eddy. Kurangnya teknik top-down ini mengakibatkan terbatasnya batasan pada sumber dan sink regional dan lokal dari N <sub>2</sub> O. Pengukuran ekosistem N <sub>2</sub> O terutama terbatas pada teknik ruang. Karena fluks N <sub>2</sub> O sangat episodik dan bervariasi secara spasial, upaya pengambilan sampel yang diperlukan untuk mengukur sumber N <sub>2</sub> O secara memadai sangat besar. Terlepas dari pentingnya N <sub>2</sub> O, biaya untuk mengkuantifikasi N <sub>2</sub> O secara memadai sangat tinggi dibandingkan dengan penelitian lain yang dapat dilakukan sebagai bagian dari PANGEA.
<b>HUTAN BAKAU DAN HUTAN PEGUNUNGAN</b>	Hutan bakau tropis dan hutan pegunungan merupakan wilayah yang relatif kecil di daerah tropis yang lebih luas, meskipun keduanya sangat relevan karena adaptasi organisme yang unik terhadap lingkungan mikro dan kontributor penting dalam siklus karbon. Lingkungan pegunungan dan pesisir memerlukan pengambilan sampel yang spesifik dan terperinci untuk memperhitungkan heterogenitas karakteristik topografi dan edafik, yang akan membatasi pengambilan sampel pada gradien berskala besar lainnya. Lingkungan pesisir memberikan tantangan tambahan dalam hal waktu pengambilan sampel (terutama untuk lidar). Namun, terdapat peluang bagi PANGEA untuk menyelaraskan upaya dengan penelitian hutan bakau dan hutan pegunungan tropis lainnya.
<b>BAGAIMANA DURASI DAN KEANDALAN PRAKIRAAN CUACA DAPAT DITINGKATKAN DI DAERAH TROPIS? BAGAIMANA PREDIKSI VARIABILITAS DAN PERUBAHAN IKLIM DAPAT DITINGKATKAN DI DAERAH TROPIS?</b>	Hal-hal tersebut merupakan pertanyaan-pertanyaan ilmiah yang penting, namun dianggap berada di luar cakupan kampanye lapangan ekologi terestrial. Namun, hasil dari PANGEA dalam meningkatkan pemahaman mengenai kontrol biosfer terhadap siklus energi, air, dan karbon akan berkontribusi secara tidak langsung dalam meningkatkan prakiraan cuaca dan prediksi variabilitas iklim.
<b>FUNGSI AKAR DAN INTERAKSI FAUNA/MIKROORGANISME TANAH DENGAN FUNGSI EKOSISTEM</b>	Topik-topik ini tidak termasuk dalam ruang lingkup utama PANGEA karena tantangan saat ini dalam mengukur proses di bawah tanah menggunakan penginderaan jauh. Elemen-elemen dari area penelitian ini dapat dimasukkan melalui proyek-proyek sinergis dengan kegiatan-kegiatan yang sedang dan akan dilakukan.

**Tabel G-1.** Item, topik, dan pertanyaan yang ditentukan berada di luar cakupan PANGEA

ITEM/TOPIK/PERTANYAAN DIKECUALIKAN	MENGAPA
<b>BAGAIMANA NUTRISI TERDISTRIBUSI SECARA VERTIKAL DALAM KANOPI HUTAN (MISALNYA, KONSENTRASI, MUSIM, VARIASI SUMBER DAYA, DAN GEOGRAFI)?</b>	Mengambil heterogenitas vertikal dari sifat-sifat daun akan membutuhkan pengambilan sampel lapangan yang jauh lebih intensif, yang akan sangat membatasi kemampuan untuk menangkap variasi di seluruh gradien dalam dinamika tajuk. Namun, ini adalah pertanyaan penting dan dapat diselidiki dalam skala kecil melalui proyek-proyek sinergis.
<b>PROSES PERMUKAAN APA YANG MENDORONG PERKEMBANGAN KONVEKTIF, CURAH HUJAN, DAN KEJADIAN EKSTREM DI HUTAN TROPIS, DAN BAGAIMANA PROSES-PROSES TERSEBUT DIPENGARUHI OLEH PERUBAHAN IKLIM?</b>	Topik penelitian ini sebagian dibahas di Q20, tetapi pengukuran yang dimaksudkan selama PANGEA tidak akan cukup untuk menjawab pertanyaan ini sebagai proyek yang berdiri sendiri. Elemen-elemen dari pertanyaan ini dapat dijawab melalui proyek-proyek kolaboratif yang lebih luas.
<b>BAGAIMANA PERUBAHAN IKLIM DAN KONDISI EKSTREM BERPADA PADA INTERAKSI AWAN-AEROSOL, KIMIA ATMOSFER, DAN UMPAN BALIK ANTARA HUTAN TROPIS DAN ATMOSFER?</b>	Pengukuran yang dilakukan selama PANGEA tidak akan cukup untuk menjawab pertanyaan ini sebagai sebuah proyek yang berdiri sendiri. Elemen-elemen dari pertanyaan ini dapat dijawab melalui proyek-proyek kolaboratif yang lebih luas.
<b>BAGAIMANA FAKTOR SOSIO-EKONOMI, SEPERTI KEPEMILIKAN LAHAN, AKSESIBILITAS, DAN KEBIJAKAN, BERINTERAKSI DENGAN FAKTOR BIOFISIK DAN IKLIM DALAM MEMPENGARUHI REGENERASI HUTAN DAN PENYEDIAAN JASA EKOSISTEM?</b>	Pertanyaan ini memberikan dasar yang penting untuk memahami mengapa penggunaan lahan dan tutupan lahan berubah. Namun, pertanyaan ini lebih banyak bergantung pada data sosial, kebijakan, dan ekonomi, dan tidak ada kaitan yang jelas antara pertanyaan ini dengan penginderaan jarak jauh. Beberapa proyek yang didanai PANGEA dapat memilih untuk menjawab pertanyaan ini dengan menggunakan metode yang inovatif. Terdapat juga peluang untuk menyelaraskan kegiatan PANGEA dengan upaya-upaya terkait untuk menjawab pertanyaan ini.
<b>APA HUBUNGAN ANTARA TITIK KRITIS SOSIAL DAN TITIK KRITIS EKOLOGIS DI DAERAH TROPIS, DAN BAGAIMANA PERBEDAANNYA DI BERBAGAI WILAYAH GEOGRAFIS TROPIS?</b>	Meskipun memahami hubungan antara bagaimana umpan balik sosial dan ekologi mempengaruhi potensi hutan tropis untuk mencapai transisi kritis sangat diperlukan, tidak ada hubungan langsung antara pertanyaan ini dengan penginderaan jarak jauh. Beberapa proyek yang didanai PANGEA dapat memilih untuk menjawab pertanyaan ini dengan menggunakan metode yang inovatif. Terdapat juga peluang untuk menyelaraskan kegiatan PANGEA dengan upaya-upaya terkait untuk menjawab pertanyaan ini.
<b>PERTANYAAN YANG RELEVAN DALAM LINGKUP PANGEA TETAPI TIDAK SECARA LANGSUNG DIDEFINISIKAN DALAM BUKU PUTIH</b>	
<b>SEBERAPA SENSITIFKAH PROYEKSI MODEL LAHAN TERHADAP BERBAGAI PARAMETERISASI KEANEKARAGAMAN FUNGSIONAL TANAMAN (MISALNYA, PARAMETERISASI KEANEKARAGAMAN PANTROPIS VS. KEANEKARAGAMAN SPESIFIK BENUA; KEANEKARAGAMAN DI DALAM KOMUNITAS SIMULASI/GRID CELL)? SIFAT FUNGSIONAL APA YANG HILANG DARI PARAMETERISASI?</b>	Kedua pertanyaan ini tidak termasuk dalam pertanyaan sains dalam PANGEA karena tidak secara langsung berkaitan dengan pengukuran penginderaan jauh. Namun demikian, mengukur dan membatasi ketidakpastian parameter model akan menjadi mekanisme utama dimana model akan diintegrasikan dengan observasi, dan kurangnya sifat fungsional yang dapat diukur oleh PANGEA akan dinilai melalui konsultasi dengan para pemodel selama penjabaran Rencana Percobaan Ringkas.
<b>APA SAJA DAMPAK DARI EFEK TEPI TERHADAP KETAHANAN HUTAN DAN KOMPLEKSITAS STRUKTURAL?</b>	Pertanyaan ini tidak secara langsung terdaftar sebagai pertanyaan ilmiah utama PANGEA, tetapi akan menjadi bagian dari investigasi yang lebih luas mengenai dampak dari beberapa pertanyaan (misalnya, Q15, Q16, Q20).
<b>BAGAIMANA PERBEDAAN WARISAN DEFORESTASI DAN DEGRADASI DI SELURUH BENUA MEMPENGARUHI PEMULIHAN HUTAN DAN PEMULIHAN JASA EKOSISTEM UTAMA?</b>	Pertanyaan ini sebagian besar bergantung pada data historis, yang mungkin berada di luar cakupan PANGEA. Namun, bidang penelitian ini akan menjadi dasar untuk mengkontekstualisasikan pengamatan di PANGEA dan akan diatasi melalui kemitraan (misalnya, MapBiomass).