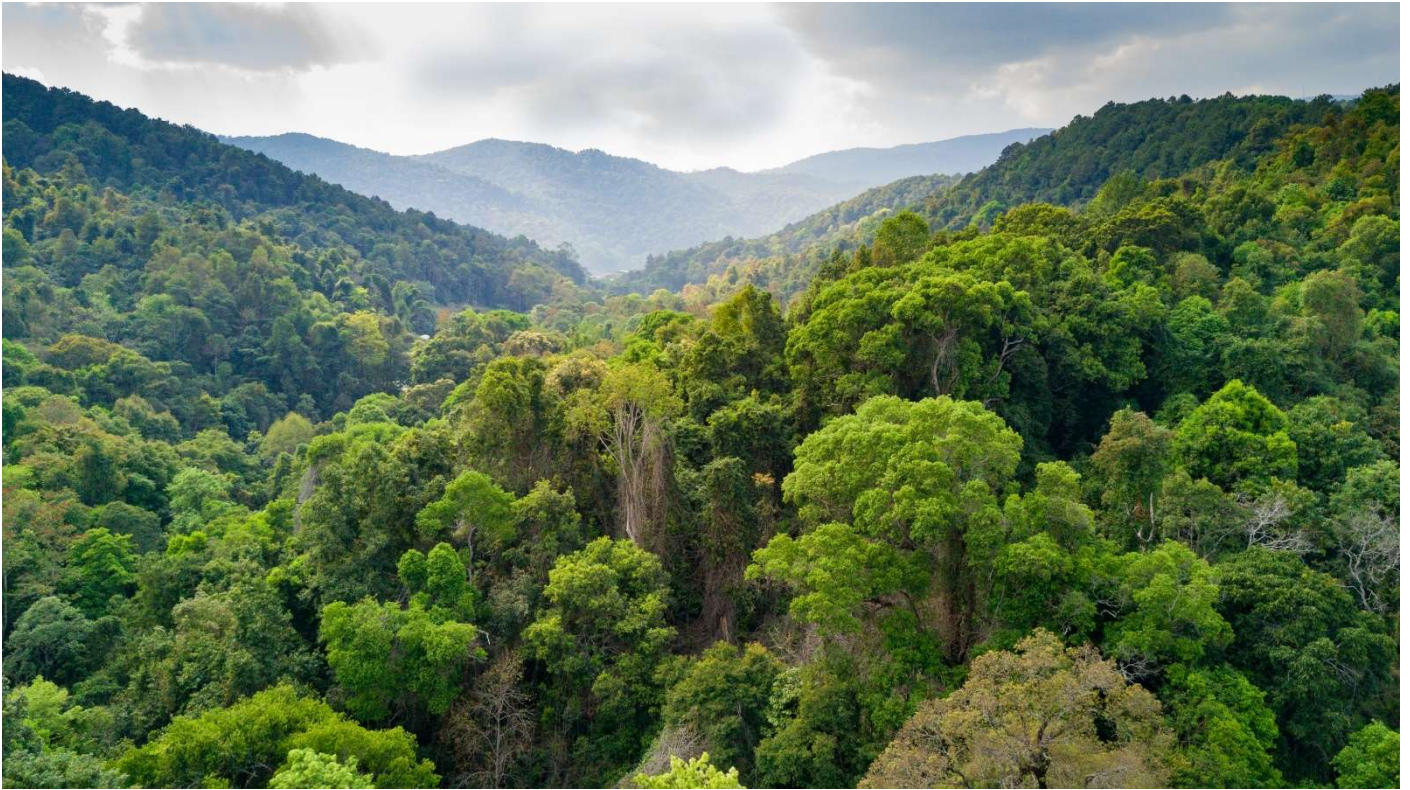




Kohlenstoffspeicherung in 350 Millionen Hektar pantropischem Wald

**Pan-tropical forest carbon storage
within 350 million hectares of land**

Thomas W. Crowther, Johan van den Hoogen & Thomas Lauber

Professur für Globale Ökosystemökologie,
Departement Umweltsystemwissenschaften, ETH Zürich

Global Ecosystem Ecology lab,
Department of Earth System Science, ETH Zürich

Aus dem Englischen übersetzt von Sandra H. Lustig

Januar/January 2021

Eine Kurzstudie im Auftrag von/Commissioned by

Stiftung Forum für Verantwortung
Pestelstraße 2
66119 Saarbrücken
www.forum-fuer-verantwortung.de
info@forum-fuer-verantwortung.de

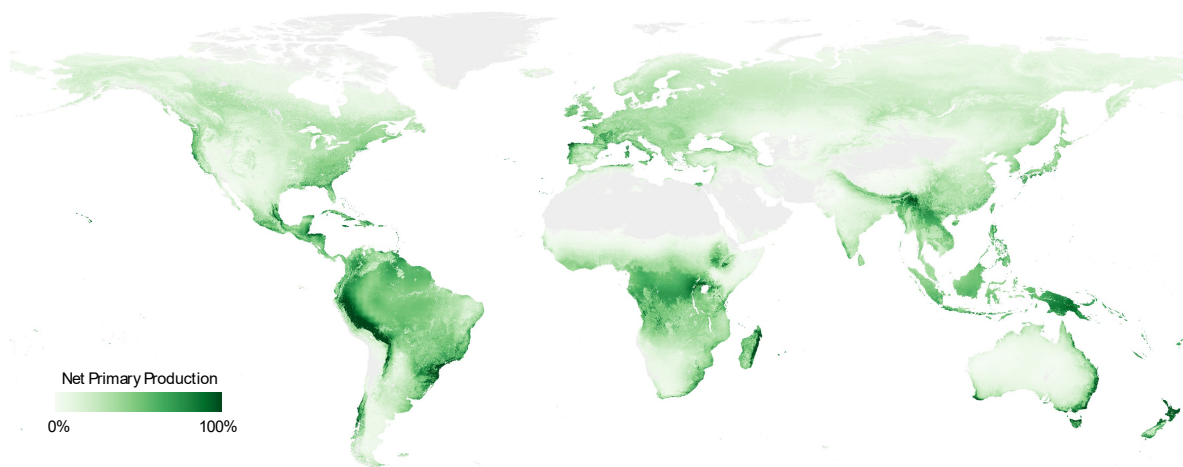


FORUM FÜR
VERANTWORTUNG
STIFTUNG

1. Einleitung

Wälder sind eine kritische Komponente des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Sie speichern mehr als 400 Gt Kohlenstoff in der Pflanzenbiomasse und mehr als 1.000 Gt Kohlenstoff im Boden (Hengl et al., 2017; Ruesch and Gibbs, 2008). Schätzungen zufolge könnte die Degradation tropischer Ökosysteme im Laufe des letzten Jahrhunderts für bis zu 100 Gt der anthropogenen Kohlenstoffemissionen verantwortlich gewesen sein (Erb et al., 2018). Angesichts der bedeutenden Rolle dieser natürlichen Ökosysteme bei der Regulierung des globalen Kohlenstoffkreislaufs hat der Schutz dieser Ökosysteme höchste Priorität und das Potenzial, Treibhausgasemissionen zu verringern (Griscom et al., 2017). Zudem kann die Erneuerung natürlicher Wälder dazu beitragen, bis zu 30% des überschüssigen Kohlenstoffs, der als Folge menschlicher Aktivitäten in die Atmosphäre gelangt ist, zu binden, wenn die Bäume zur vollen Reife gelangen können (Bastin et al., 2020).

Tropenwälder sind die produktivsten Wälder weltweit, denn warme, feuchte Bedingungen fördern das rasche Wachstum großer Bäume (siehe Abbildung 1). Folglich sind Tropenwälder die größten Speicher von Kohlenstoff und Biodiversität in der terrestrischen Biosphäre. Erhaltung und Schutz tropischer Ökosysteme stellen daher eine der kritischsten Komponenten im Kampf gegen den Verlust von Biodiversität und steigende Kohlenstoffkonzentrationen in der Atmosphäre dar (Griscom et al., 2017). Da regelmäßig festgestellt worden ist, dass vielfältige Mischungen von Arten am meisten Kohlenstoff binden (Liang et al., 2016), ist der Schutz bestehender, gesunder Wälder im Zusammenhang mit dem Klimawandel eine oberste Priorität.



Nettoprimärproduktion

Abbildung 1. Relativierte Karte der Nettoprimärproduktivität. Abschätzung auf Grundlage des MODIS-Satellitenclusters. Die Regionen mit der höchsten Pflanzenproduktivität sind in dunkleren Grüntönen dargestellt, die weniger produktiven Regionen in weiß.

Angesichts der Bedeutung der Tropenwälder im Kampf gegen den Klimawandel wurden mehrere internationale Initiativen gegründet, um deren Erhaltung zu fördern. Insbesondere die Bonn Challenge hat ambitionierte Ziele für den Erhalt von 350 Millionen Hektar Tropenwald gesetzt. Die Kohlenstoffspeicherung des Waldes unterscheidet sich jedoch drastisch zwischen verschiedenen tropischen Ökosystemen (Ruesch and Gibbs, 2008), weswegen die Auswirkungen dieser Bemühungen je nach den für den Walderhalt ausgewählten Gebieten variieren werden. Eine Evaluation der Auswirkungen der Walderhaltung auf die terrestrische Kohlenstoffspeicherung erfordert daher Informationen über die in den betreffenden Regionen vorhandenen Kohlenstoffmengen, die durch Degradierung gefährdet werden könnten.

2. Methode

In diesem Bericht setzen wir eine Kombination von Modellierungsergebnissen ein, um die Kohlenstoffspeicherung in 350 Millionen Hektar Tropenwald in Afrika, Asien und Amerika zu erforschen. Zur Abschätzung der oberirdischen Waldbiomasse stellten wir eine Reihe globaler Biomasseprodukte zusammen. Im vergangenen Jahrzehnt wurde die Kohlenstoffspeicherung durch Wälder mittels prozessbasierter Modelle (Ruesch and Gibbs, 2008), Satellitendaten (GlobBiomass) und Zusammenstellungen von Waldinventurdaten vom Boden aus (Pan et al., 2011) kartiert (eine Liste bestehender globaler Produkte ist in Tabelle 1 zu finden). Obgleich einige Aussagen produktübergreifend einheitlich sind (z.B. zeigen alle, dass die größte Kohlenstoffspeicherung in den Tropen besteht), gibt es Unterschiede zwischen den Produkten bezüglich der exakten Verteilung dieser Kohlenstoffspeicherung im kleineren Maßstab. Wir verwendeten vom Boden aus durchgeführte Messungen der Waldbiomasse aus der Global Forest Biodiversity Initiative (Steidinger et al., 2019), um die bestehenden Biomasseprodukte zu evaluieren und zu validieren. Das Produkt GlobBiomass war der bei Weitem beste Prädiktor der Variation zwischen den verschiedenen Regionen des Tropenwaldes, da es mehr als 84% der Variation der 1,2 Millionen Schätzungen der Biomasse der Waldinventur erklären konnte (Schätzung unter Verwendung der [RESOLVE](#)-Biomkarte (Dinerstein et al., 2017) – siehe Zusätzliche Informationen). Folglich verwendeten wir dieses auf Satellitendaten basierende Produkt, um die mittlere oberirdische Waldbiomasse in den verschiedenen tropischen Biomen auf jedem Kontinent abzuschätzen.

Für die unterirdische Kohlenstoffspeicherung verwendeten wir die globalen SoilGrids-Produkte, welche den prozentualen Anteil von Kohlenstoff und der Lagerungsdichte bis in eine Tiefe von 2 m unter der Bodenoberfläche bei einer räumlichen Auflösung von 250 m abschätzen. Durch die Skalierung des prozentualen Kohlenstoffanteils mit der Lagerungsdichte des Bodens an jedem Standort (Gesamtkohlenstoff=

Kohlenstoffanteil*Lagerungsdichte) konnte die unterirdische Kohlenstoffspeicherung aller Bodenhorizonte an jedem Standort in den Tropen geschätzt werden. Anhand dieser dreidimensionalen Karte des Kohlenstoffs im Boden berechneten wir die mittlere Kohlenstoffspeicherung im Boden in den Tropenwaldbiomen auf jedem Kontinent.

Bezeichnung des Produkts	Räumliche Auflösung	DOI
GlobBiomass – Oberirdische Biomasse	≈100m	https://doi.org/10.5194/essd-2020-148
IPCC – Globale Biomasse	≈1km	Nicht vorhanden
SpawnEtAl – Harmonisierte oberirdische Biomasse	≈300m	https://doi.org/10.1038/s41597-020-0444-4
SpawnEtAl – Harmonisierte unterirdische Biomasse	≈300m	https://doi.org/10.1038/s41597-020-0444-4
UNEP WCMC – Globale Biomasse	300m	https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0128
SoilGrids250m – Organische Kohlenstoffbestände im Boden	≈250m	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748
SandermanEtAl – Organische Kohlenstoffbestände im Boden	≈10km	https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114

Tabelle 1: Liste der verwendeten globalen Kohlenstoffprodukte.

3. Ergebnisse und Implikationen

Es wurde eine erhebliche Variation in der Kohlenstoffspeicherung durch Wälder in verschiedenen Regionen der Tropen festgestellt. Treiber dieser Variation sind wahrscheinlich ein breites Spektrum abiotischer Faktoren (u.a. Klima, Boden und topografische Variation), ökologische Faktoren (Typ und Vielfalt der Baumarten) sowie eine erhebliche Variation durch Menschen verursachte Störungen. Unserer Kohlenstoffkarte zufolge speichert Amerika gegenwärtig den größten Anteil des oberirdischen Tropenwald-Kohlenstoffs mit durchschnittlich 58,8 Tonnen pro Hektar (t/ha), wobei die asiatischen Wälder 38,4 t/ha und die afrikanischen Wälder 29,0 t/ha speichern. Dieser große Anteil an Kohlenstoff, der in amerikanischen Tropenwäldern gespeichert ist, ist vermutlich eine Folge des relativen Anteils der tropischen Feucht- gegenüber den tropischen Trockenwäldern. Bei einem größeren Anteil der Tropenwälder

in Afrika und Asien handelt es sich um Trockenwälder, wo die jährlichen Trockenzeiten das Wachstum und die Kohlenstoffspeicherung der Bäume relativ zu tropischen Regenwäldern erheblich begrenzen (siehe Tabelle 2).

Im Gegensatz zur oberirdischen Kohlenstoffspeicherung war die Dichte der unterirdischen Kohlenstoffspeicherung (einschließlich des Kohlenstoffs im Boden und in Wurzeln bis in eine Tiefe von 2 Metern) in den asiatischen Wäldern mit durchschnittlich 233 t/ha am höchsten, gefolgt von den amerikanischen Wäldern mit 187,1 t/ha und den afrikanischen Wäldern mit 111 t/ha. Wahrscheinlich ist diese hohe mittlere Kohlenstoffspeicherung im Boden in asiatischen Wäldern auf den großen Anteil an Feuchtgebieten und Mooren zurückzuführen. Beispielsweise sind große Regionen Indonesiens mit wassergesättigtem Boden bedeckt, wo anaerobe Bedingungen den Abbau organischen Materials im Boden begrenzen können, was die enorme Akkumulation von Kohlenstoff im Boden fördert (siehe Tabelle 2).

Eine Summierung dieser Schätzungen der ober- und unterirdischen Kohlenstoffspeicherung deutet darauf hin, dass afrikanische Wälder gegenwärtig durchschnittlich 140 t/ha speichern. Der Schutz von 350 Millionen Hektar afrikanischem Wald könnte den Schutz von 49 Gt Kohlenstoff absichern. Asiatische Wälder speichern durchschnittlich 267,4 t/ha; folglich enthalten 350 Millionen Hektar 95 Gt Kohlenstoff. Auf dem amerikanischen Kontinent speichert der durchschnittliche Tropenwald 245,9 t/ha; auf 350 Millionen Hektar werden also gegenwärtig 86 Gt Kohlenstoff gespeichert. Angesichts der Tatsache, dass die Menschheit im Laufe des vergangenen Jahrhunderts die Belastung der Atmosphäre um fast 300 Gt Kohlenstoff erhöht hat, stellen diese Ergebnisse klar heraus, dass der Schutz von 350 Millionen Hektar Tropenwald ein erheblicher Beitrag zur Kohlenstoffspeicherung wäre (siehe Tabelle 2).

	Afrikanische Tropen	Asiatische Tropen	Amerikanische Tropen
Durchschnittlicher oberirdischer Kohlenstoff (CO ₂ -Äquivalent)*	29,0 t/ha (106,33 t/ha)	38,4 t/ha (140,8 t/ha)	58,8 t/ha (215,6 t/ha)
Durchschnittlicher unterirdischer Kohlenstoff (CO ₂ -Äquivalent)	111,0 t/ha (407 t/ha)	233 t/ha (854,33 t/ha)	187,1 t/ha (686,03 t/ha)
Durchschnittlicher Kohlenstoff des Ökosystems (CO ₂ -Äquivalent)	140,0 t/ha (513,33 t/ha)	271,4 t/ha (995,13 t/ha)	245,9 t/ha (901,63 t/ha)
Gesamt-Kohlenstoff auf 350 Millionen ha (CO ₂ -Äquivalent)	49 Gt (179,67 t/ha)	94,9 Gt (347,97 t/ha)	86 Gt (315,33 t/ha)

*Anmerkung: eine Tonne Kohlenstoff entspricht 44/12 (3,67) Tonnen CO₂.

Tabelle 2: Schätzung der mittleren Kohlenstoffspeicherung in Tropenwäldern verschiedener Kontinente.

Selbstverständlich sind die Auswirkungen dieser Arbeit direkt von der Dauerhaftigkeit der Schutzbemühungen abhängig. Global betrachtet werden Wälder im Zeitverlauf jünger, da zunehmende Störungen durch den Menschen die Kapazitäten dieser Ökosysteme, zur Reife zu gelangen, weiterhin begrenzen (McDowell et al., 2020). Relativ zu ihrer Größe binden diese jungen Bäume Kohlenstoff schneller als alte, aber verglichen mit alten Bäumen ist ihr Potenzial, Kohlenstoff zu binden, begrenzt. Ein ausgewachsener Baum speichert zehntausende Mal so viel Kohlenstoff wie Setzlinge derselben Art. Ausgewachsene Wälder speichern daher weitaus mehr Kohlenstoff sowohl im Boden als auch in der Vegetation, und sie bieten weitaus mehr Platz für Biodiversität als junge, sich entwickelnde Wälder (McDowell et al., 2020). Es ist absolut kritisch, dass wir diese Ökosysteme langfristig (70-100 Jahre) schützen, wenn wir das Potenzial zur Speicherung von Kohlenstoff erreichen wollen.

4. Einschränkungen und Überlegungen

Wie oben erwähnt, beeinflussen vielfältige Faktoren die räumlichen Muster der Kohlenstoffspeicherung in unterschiedlichen Tropenwäldern. Grobe Durchschnittswerte auf der Ebene der Kontinente können folglich keine spezifischen Regionen hervorheben, auf die man sich konzentrieren sollte. Zudem können sie die Bandbreite der Werte der Kohlenstoffspeicherung in der gesamten Region nicht widerspiegeln. Daher zeigen sie nicht notwendigerweise das volle Potenzial der Kohlenstoffspeicherung in den jeweiligen Gebieten auf. Beispielsweise speichern tropische Regen- und Trockenwälder substantiell unterschiedliche Mengen Kohlenstoff, und zwar sowohl ober- als auch unterirdisch. Es könnte notwendig sein, diese beiden verschiedenartigen Ökosystemtypen einzeln zu betrachten, um festzustellen, wo in den tropischen Regionen das höchste Potenzial für die Kohlenstoffspeicherung tatsächlich existiert. Unsere groben Durchschnittswerte können jedoch robuste Einsichten in das volle globale Potenzial der Walderhaltung liefern.

Es ist wichtig zu bedenken, dass diese Werte die geschätzte Gesamtmenge Kohlenstoff, die heute in diesen Wäldern vorhanden ist, abbilden. Diese Ökosysteme zu degradieren würde nicht notwendigerweise sämtlichen Kohlenstoff aus dem System entfernen, denn umgewandeltes Land kann je nach Flächennutzung ebenfalls eine erhebliche Menge Kohlenstoff speichern. Jedoch bewirkt die Degradation von Ökosystemen im Allgemeinen erhebliche Minderungen der im Wald gespeicherten Kohlenstoffmengen. Deswegen machen die von uns präsentierten Werte auf die Kohlenstoffmenge aufmerksam, die durch Degradation gefährdet wäre. Diese Gebiete wirksam zu schützen würde wahrscheinlich den Schutz dieser Menge Kohlenstoff langfristig garantieren.

5. Fazit

Tropenwälder sind unabdingbare Biodiversitäts- und Kohlenstoffspeicher. Der Umfang der Kohlenstoffspeicherung in diesen Regionen unterstreicht, dass der Schutz von 350 Millionen Hektar Tropenwald einen erheblichen Teil (bis zu 30%) der anthropogenen Treibhausgasemissionen langfristig direkt limitieren würde. Zudem könnte die Wiederherstellung von degradierten Wäldern das Potenzial haben, zusätzlichen Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu entziehen. Unsere Schätzungen basieren auf durchschnittlichen Kohlenstoffbeständen in bestehenden ausgewachsenen Wäldern, weswegen man vernünftigerweise annehmen kann, dass sanierte Wälder letztlich genauso viel Kohlenstoff binden könnten und einer gleichen natürlichen Vielfalt heimischer Arten Raum bieten, wenn sie zur vollen Reife gelangen können. Es ist unklar, wie lange es brauchen würde, bis sanierte Ökosysteme ihr maximales Kohlenstoffbindungspotenzial erreichen, insbesondere im Boden, aber wahrscheinlich würde keines dieser Ökosysteme zur Reife gelangen, es sei denn, sie würden für mindestens 70-100 Jahre geschützt. Es ist absolut kritisch, dass es sich bei Investitionen in Naturschutz oder Sanierung um langfristige Verpflichtungen handelt, denn das volle Potenzial dieser Ökosysteme, Kohlenstoff zu speichern, wird erst im nächsten Jahrhundert erreicht. Die Auswahl der optimalen 350 Millionen Hektar Land sollte nicht nur bezüglich der Kohlenstoffspeicherung optimiert werden. Vielmehr ist es unerlässlich, dass Sanierungsmaßnahmen auch die Biodiversität und die Existenzgrundlagen der Menschen, die von diesen gesunden Wäldern abhängig sind, mit einbeziehen. Angesichts der zahlreichen Synergien zwischen Kohlenstoffspeicherung, vielfältigen Ökosystemen und menschlichen Existenzgrundlagen handelt es sich dabei nicht zwingend um eine Herausforderung. Dennoch erfordern die Kompromisse, die zwischen diesen Attributen zu finden sind, sorgfältige Abwägung auf der lokalen Ebene. Nichtsdestotrotz bietet unsere Analyse einige erste Erkenntnisse zur Festlegung sinnvoller Kohlenstoffziele, die mit massiv umgesetztem Naturschutz erreichbar sein könnten.

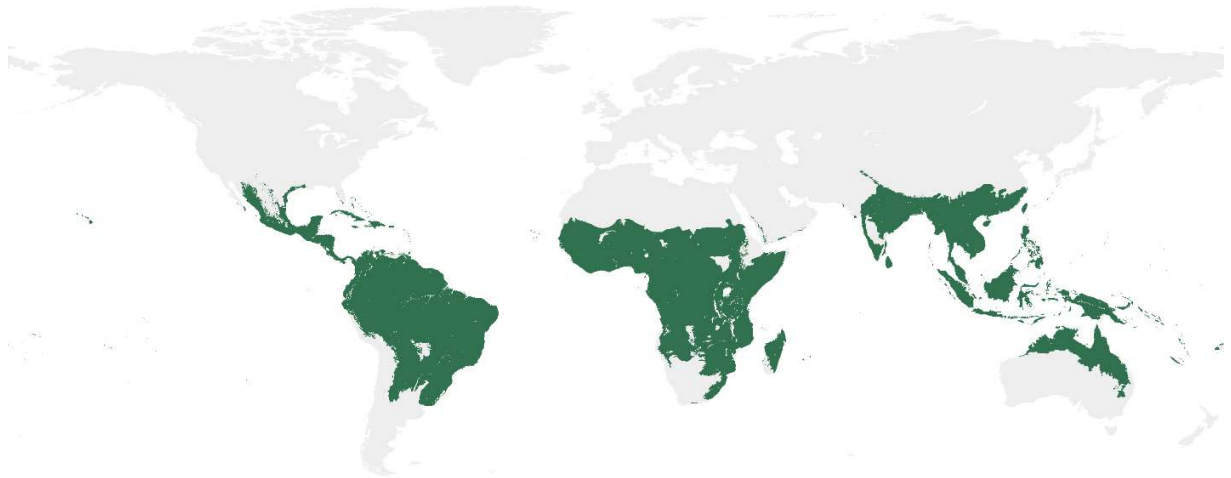
6. Literatur

- Bastin, J., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., 2020. The global tree restoration potential 79, 76–79.
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N.D., Wikramanayake, E., Hahn, N., Palminteri, S., Hedao, P., Noss, R., Hansen, M., Locke, H., Ellis, E.C., Jones, B., Barber, C.V., Hayes, R., Kormos, C., Martin, V., Crist, E., Sechrest, W., Price, L., Baillie, J.E.M., Weeden, D., Suckling, K., Davis, C., Sizer, N., Moore, R., Thau, D., Birch, T., Potapov, P., Turubanova, S., Tyukavina, A., De Souza, N., Pintea, L., Brito, J.C., Llewellyn, O.A., Miller, A.G., Patzelt, A., Ghazanfar, S.A., Timberlake, J., Klöser, H., Shennan-Farpón, Y., Kindt, R., Lillesø, J.P.B., Van Breugel, P., Gaudal, L., Voge, M., Al-Shammari, K.F., Saleem, M., 2017. An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm. *Bioscience* 67, 534–545. doi:10.1093/biosci/bix014
- Erb, K., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A.L.S., Carvalhais, N., Fetzel, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M., 2018. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nat. Publ. Gr.* 553, 73–76. doi:10.1038/nature25138
- Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P.W., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., Schlesinger, W.H., Shoch, D., Siikamäki, J. V, Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., 2017. Natural climate solutions 114, 11645–11650. doi:10.1073/pnas.1710465114
- Hengl, T., De Jesus, J.M., Heuvelink, G.B.M., Gonzalez, M.R., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangquan, W., Wright, M.N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M.A., Vargas, R., MacMillan, R.A., Batjes, N.H., Leenaars, J.G.B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., Kempen, B., 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS One* 12, 1–40. doi:10.1371/journal.pone.0169748
- Liang, J., Crowther, T.W., Picard, N., Wiser, S., Zhou, M., Alberti, G., Schulze, E.-D., McGuire, A.D., Bozzato, F., Pretzsch, H., De-Miguel, S., Paquette, A., Hérault, B., Scherer-Lorenzen, M., Barrett, C.B., Glick, H.B., Hengeveld, G.M., Nabuurs, G.-J., Pfautsch, S., Viana, H., Vibrans, A.C., Ammer, C., Schall, P., Verbyla, D., Tchebakova, N., Fischer, M., Watson, J.V., Chen, H.Y.H., Lei, X., Schelhaas, M.-J., Lu, H., Gianelle, D., Parfenova, E.I., Salas, C., Lee, E., Lee, B., Kim, H.S., Bruehlheide, H., Coomes, D.A.,

- Piotto, D., Sunderland, T., Schmid, B., Gourlet-Fleury, S., Sonké, B., Tavani, R., Zhu, J., Brandl, S., Vayreda, J., Kitahara, F., Searle, E.B., Neldner, V.J., Ngugi, M.R., Baraloto, C., Frizzera, L., Bałazy, R., Oleksyn, J., Zawila-Niedźwiecki, T., Bouriaud, O., Bussotti, F., Finér, L., Jaroszewicz, B., Jucker, T., Valladares, F., Jagodzinski, A.M., Peri, P.L., Gonmadje, C., Marthy, W., O'Brien, T., Martin, E.H., Marshall, A.R., Rovero, F., Bitariho, R., Niklaus, P.A., Alvarez-Loayza, P., Chamuya, N., Valencia, R., Mortier, F., Wortel, V., Engone-Obiang, N.L., Ferreira, L.V., Odeke, D.E., Vasquez, R.M., Lewis, S.L., Reich, P.B., 2016. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* (80-.). 354, aaf8957. doi:10.1126/science.aaf8957
- McDowell, N.G., Allen, C.D., Anderson-Teixeira, K., Aukema, B.H., Bond-Lamberty, B., Chini, L., Clark, J.S., Dietze, M., Grossiord, C., Hanbury-Brown, A., Hurtt, G.C., Jackson, R.B., Johnson, D.J., Kueppers, L., Lichstein, J.W., Ogle, K., Poulter, B., Pugh, T.A.M., Seidl, R., Turner, M.G., Uriarte, M., Walker, A.P., Xu, C., 2020. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science* (80-.). 368. doi:10.1126/science.aaz9463
- Pan, Y., Birdsey, R. a, Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W. a, Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, a D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., Hayes, D., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988–93. doi:10.1126/science.1201609
- Ruesch, A., Gibbs, H.K., 2008. New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map For the Year 2000., in: New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map For the Year 2000. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem.
- Steidinger, B., Crowther, T., Liang, J., Van Nuland, M., Werner, GD Reich, P., Nabuurs, G., De-Miguel, S., Zhou, M., Picard, N., Herault, B., Zhao, X., Zhang, C., Routh, D., List], [GFBi Author, Peay, K., 2019. Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest tree symbioses. *Nature* in press.

7. Zusätzliche Informationen

Wir benutzten die RESOLVE Biomkarte (Dinerstein et al., 2017) bei der Auswahl der Tropenwaldregionen. In dieser Karte (siehe unten) sind nur die Tropenwaldregionen dargestellt.



Pan-tropical forest carbon storage within 350 million hectares of land

Thomas W. Crowther, Johan van den Hoogen & Thomas Lauber

Global Ecosystem Ecology lab,
Department of Earth System Science, ETH Zürich

1. Introduction

Forests are a critical component of the global carbon (C) cycle, storing over 400 Gt carbon in plant biomass and over 1000 Gt carbon within the soil (Hengl et al., 2017; Ruesch and Gibbs, 2008). It is estimated that the degradation of tropical ecosystems may have contributed up to 100 Gt carbon of anthropogenic carbon emissions over the last century (Erb et al., 2018). Given the considerable role of these natural ecosystems in governing the global carbon cycle, protecting these ecosystems is the highest priority, with the potential to directly limit greenhouse gas emissions (Griscom et al., 2017), and the recovery of natural forests can also contribute to capturing up to 30% of the excess carbon that exists in the atmosphere as a result of human activity, if the trees can recover to full maturity (Bastin et al., 2020).

Tropical forests are the most productive components of the global forest system, as warm, moist conditions promote the rapid growth of large trees (See Figure 1). As a result, tropical forests are the largest repository of carbon and biodiversity within the terrestrial biosphere. The conservation and protection of tropical ecosystems represents one of the most critical components in the fight against biodiversity loss and rising atmospheric carbon concentrations (Griscom et al., 2017). Given that diverse mixtures of species have consistently been found to capture the largest proportion of carbon (Liang et al., 2016), the protection of existing, healthy forest is a top climate change priority.

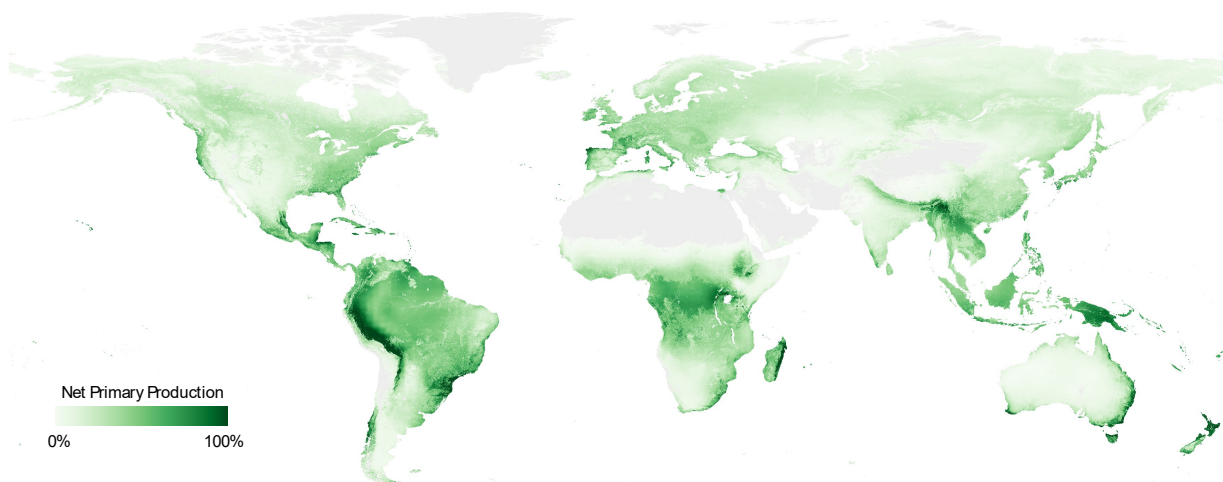


Figure 1. Relativized map of net primary productivity estimated from the MODIS satellite cluster, showing the regions of highest plant productivity in darker green colours, with less productive regions in white.

Given the importance of tropical forests in the fight against, various international initiatives have been established to promote the promote forest conservation within tropical regions. In particular, the Bonn Challenge has set ambitious targets for the conservation of 350 million hectares of tropical forest. However, forest carbon storage varies drastically across tropical ecosystems (Ruesch and Gibbs, 2008), and so the impacts of this effort will vary depending on the areas that are selected for conservation. Evaluating the impacts of forest conservation on terrestrial carbon storage requires information about the carbon that exists in those regions, that would otherwise be vulnerable to degradation.

2. Approach

In this report, we use a combination of modeling products to explore the carbon storage within 350 million hectares of tropical forest in Africa, Asia and America. For estimating aboveground forest biomass, we compiled a range of global biomass products. There have been several efforts to map forest carbon storage – using process-based models (Ruesch and Gibbs, 2008), satellite data (GlobBiomass), and compilations of ground sourced forest inventory data (Pan et al., 2011) – over the last decade (see Table 1 for list of existing global products). Although there are some clear consistencies across these products (e.g. all show the largest carbon storage exists within the tropics), none of them agree entirely on the exact distribution of this carbon storage at the fine scale. As such, we used direct ground-sourced measurements of forest biomass estimates from the Global Forest Biodiversity initiative (Steidinger et al., 2019) to evaluate and validate the existing biomass products. Explaining over 84% of the variation in biomass estimates across 1.2 million forest inventory observations, the GlobBiomass product was by far the best predictor of forest biomass variation across the tropical forest regions (estimated using the [RESOLVE](#) biome map (Dinerstein et al., 2017) – see Supplementary information). As such, we use this satellite-derived product to estimate mean aboveground forest biomass across the different tropical biomes in each continent.

For belowground carbon storage, we used the global SoilGrids carbon storage layer, which includes estimates of percentage carbon and bulk density at the 250m spatial resolution, and until a depth of 2m below the soil surface. By scaling the percentage of carbon by the bulk density of the soil at each location (total carbon = proportion carbon * bulk density), it was possible to estimate belowground carbon storage at each location across the Tropics. Using this spatially-explicit map of soil carbon, we calculated the mean soil carbon storage across the tropical forest biomes in each continent.

Band Name	Spatial Resolution	DOI
GlobBiomass - Aboveground Biomass	≈100m	https://doi.org/10.5194/essd-2020-148
IPCC - Global Biomass	≈1km	None
SpawnEtAl - Harmonized Aboveground Biomass	≈300m	https://doi.org/10.1038/s41597-020-0444-4
SpawnEtAl - Harmonized Belowground Biomass	≈300m	https://doi.org/10.1038/s41597-020-0444-4
UNEP WCMC - Global Biomass	300m	https://doi.org/10.1098/rstb.2019.0128
SoilGrids250m - Soil Organic Carbon Stocks	≈250m	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748
SandermanEtAl - Soil Organic Carbon Stocks	≈10km	https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114

Table 1: List of existing global forest biomass products used.

3. Results and implications

There was considerable variation in forest carbon storage across tropical regions. This variation is likely to be driven by a wide range of abiotic factors (including climate, soil and topographic variation), ecological factors (the identity and diversity of tree species) well as considerable variation in human disturbance. According to our harmonized carbon map, America currently stores the largest proportion of aboveground tropical forest carbon, with an average of 58.8 tonnes per hectare (t/ha), with Asian and African forests storing 38.4 t/ha and 29.0 t/ha, respectively. This large proportion of carbon stored within American tropical forests is likely due to the relative proportion of tropical wet forests vs tropical dry forests. A larger proportion of tropical forests in Africa and Asia are dry forests, where annual dry seasons considerably limit the growth and carbon storage of trees, relative to tropical rainforests (see Table 2).

In contrast to the aboveground carbon storage, the density of belowground carbon storage (including soil and root carbon to a depth of 2 meters) was highest in Asian forests, with an average of 233 t/ha, followed by American and African forests, which store 187.1 t/ha and 111 t/ha, respectively. It is likely that this high mean soil carbon storage in Asian forests is due to the large proportion of wetlands and peatlands. For example, large

regions of Indonesia are covered by waterlogged soil, where anaerobic conditions can limit decomposition within the soil, driving the vast accumulation of carbon within the soil (see Table 2).

Summing these aboveground and belowground estimates of carbon storage suggests that African forests currently store an average of 140 t/ha. As such, the protection of 350 million hectares of African forest could ensure the protection of 49 Gt carbon. Asian forests store an average of 267.4 t/ha, so 350 million hectares contain 95 Gt carbon. Within the Americas, the average tropical forest stores 245.9 t/ha, and so 350 million hectares currently store 86 Gt carbon. Given that humans have increased the atmospheric carbon burden by almost 300 Gt over the last century, these results clearly highlight that the conservation of 350 million hectares of tropical forest would be a considerable contribution to carbon storage on land (see Table 2).

	African tropics	Asian tropics	American tropics
Average aboveground C	29.0 t/ha	38.4 t/ha	58.8 t/ha
(CO ₂ equivalent)*	(106.33 t/ha)	(140.8 t/ha)	(215.6 t/ha)
Average belowground C	111.0 t/ha	233 t/ha	187.1 t/ha
(CO ₂ equivalent)	(407 t/ha)	(854.33 t/ha)	(686.03 t/ha)
Average ecosystem C	140.0 t/ha	271.4 t/ha	245.9 t/ha
(CO ₂ equivalent)	(513.33 t/ha)	(995.13 t/ha)	(901.63 t/ha)
Total C within 350 mha	49 Gt	94.9 Gt	86 Gt
(CO ₂ equivalent)	(179.67 t/ha)	(347.97 t/ha)	(315.33 t/ha)

*Note: one tonne of carbon equals 44/12 (3.67) tonnes of CO₂.

Table 2: Estimated mean carbon storage within tropical forests of different continents.

Of course, the implications of this work depend directly on the duration of conservation efforts. Globally, forests are getting younger over time, as increasing human disturbance

continues to limit the capacity of these ecosystems to reach maturity (McDowell et al., 2020). These young trees capture carbon at a faster rate than old trees relative to their size, but they are limited in their carbon storage potential relative to old trees old trees. One mature tree will store tens of thousands of times more carbon than saplings of the same species. As such, mature forests store vastly more carbon both in the soil and vegetation, and they support vastly more biodiversity than young, developing forests (McDowell et al., 2020). Protecting these ecosystems in the long term (70-100 years) is absolutely critical if we are going to achieve the carbon storage potential.

4. Limitations and Considerations

As mentioned above, there are a wide variety of factors influencing the spatial patterns of carbon storage across tropical forests. As such, coarse continent-scale average values cannot highlight specific regions to focus on. In addition, they cannot reflect the range of carbon storage values across the region, so they do not necessarily reflect the full potential for carbon storage in the respective areas. For example, tropical moist and dry forests store substantially different amounts of carbon both aboveground and belowground. Splitting out these two distinct ecosystem types might be necessary to identify where the highest potential for carbon storage truly exists within tropical regions. However, these broad average values can provide robust insights into the full global potential of forest conservation.

It is important to consider that these values simply represent the total estimated amount of carbon in these forests at the present day. Degrading these ecosystems would not necessarily remove all of the carbon from the system, as converted land can still store a considerable amount of carbon, depending on the resulting land use. However, the degradation of ecosystems generally causes considerable declines in forest carbon, and so the values we present highlight the amount of carbon that would be vulnerable to

degradation. As such, conserving these areas effectively would be likely to guarantee the protection of this much carbon in the long term.

5. Conclusions

Tropical forests are essential repositories of biodiversity and carbon. The scale of carbon storage in these regions highlights that protecting 350 million hectares of tropical would directly limit a considerable proportion (up to 30%) of anthropogenic greenhouse gas emissions in the long term. In addition, restoring additional land may have the potential to act as an additional carbon drawdown mechanism. Our estimates were generated from average carbon stocks of existing mature forests, so it is reasonable to assume that restored forests might ultimately reach this level of carbon capture if they are allowed to reach full maturity, with the natural diversity of native species. It remains unclear how long this would take for restored ecosystems to capture their maximum carbon sequestration potential, especially in the soil, but none of those ecosystems would be likely to reach maturity unless they could be protected for over 70-100 years. As such, it is absolutely critical that investment in conservation or restoration are long-term commitments, as the full carbon storage potential of these ecosystems is only reached by the next century. The selection of the optimal 350 million hectares of land should not only be optimized for carbon, but it is essential that restoration efforts are also for the biodiversity and human livelihoods that depend on these healthy forests. Given many of the synergies between carbon storage, diverse ecosystems and human livelihoods, this may not be a challenge, but the trade-offs between these attributes require careful consideration at local scales. Yet, our analysis provides some initial insights to help establishing meaningful carbon targets that may be achievable if massive-scale conservation efforts were achieved.

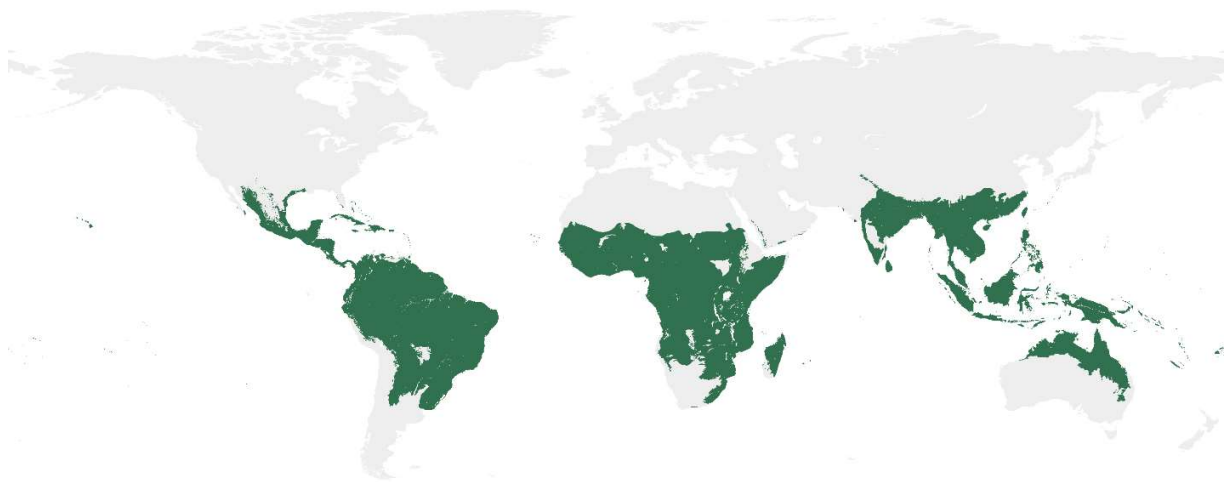
6. References

- Bastin, J., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., 2020. The global tree restoration potential 79, 76–79.
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N.D., Wikramanayake, E., Hahn, N., Palminteri, S., Hedao, P., Noss, R., Hansen, M., Locke, H., Ellis, E.C., Jones, B., Barber, C.V., Hayes, R., Kormos, C., Martin, V., Crist, E., Sechrest, W., Price, L., Baillie, J.E.M., Weeden, D., Suckling, K., Davis, C., Sizer, N., Moore, R., Thau, D., Birch, T., Potapov, P., Turubanova, S., Tyukavina, A., De Souza, N., Pintea, L., Brito, J.C., Llewellyn, O.A., Miller, A.G., Patzelt, A., Ghazanfar, S.A., Timberlake, J., Klöser, H., Shennan-Farpón, Y., Kindt, R., Lillesø, J.P.B., Van Breugel, P., Gaudal, L., Voge, M., Al-Shammari, K.F., Saleem, M., 2017. An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm. *Bioscience* 67, 534–545. doi:10.1093/biosci/bix014
- Erb, K., Kastner, T., Plutzer, C., Bais, A.L.S., Carvalhais, N., Fetzel, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M., 2018. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nat. Publ. Gr.* 553, 73–76. doi:10.1038/nature25138
- Griscom, B.W., Adams, J., Ellis, P.W., Houghton, R.A., Lomax, G., Miteva, D.A., Schlesinger, W.H., Shoch, D., Siikamäki, J. V, Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., 2017. Natural climate solutions 114, 11645–11650. doi:10.1073/pnas.1710465114
- Hengl, T., De Jesus, J.M., Heuvelink, G.B.M., Gonzalez, M.R., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangquan, W., Wright, M.N., Geng, X., Bauer-Marschallinger, B., Guevara, M.A., Vargas, R., MacMillan, R.A., Batjes, N.H., Leenaars, J.G.B., Ribeiro, E., Wheeler, I., Mantel, S., Kempen, B., 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS One* 12, 1–40. doi:10.1371/journal.pone.0169748
- Liang, J., Crowther, T.W., Picard, N., Wiser, S., Zhou, M., Alberti, G., Schulze, E.-D., McGuire, A.D., Bozzato, F., Pretzsch, H., De-Miguel, S., Paquette, A., Hérault, B., Scherer-Lorenzen, M., Barrett, C.B., Glick, H.B., Hengeveld, G.M., Nabuurs, G.-J., Pfautsch, S., Viana, H., Vibrans, A.C., Ammer, C., Schall, P., Verbyla, D., Tchebakova, N., Fischer, M., Watson, J.V., Chen, H.Y.H., Lei, X., Schelhaas, M.-J., Lu, H., Gianelle, D., Parfenova, E.I., Salas, C., Lee, E., Lee, B., Kim, H.S., Bruehlheide, H., Coomes, D.A.,

- Piotto, D., Sunderland, T., Schmid, B., Gourlet-Fleury, S., Sonké, B., Tavani, R., Zhu, J., Brandl, S., Vayreda, J., Kitahara, F., Searle, E.B., Neldner, V.J., Ngugi, M.R., Baraloto, C., Frizzera, L., Bałazy, R., Oleksyn, J., Zawila-Niedźwiecki, T., Bouriaud, O., Bussotti, F., Finér, L., Jaroszewicz, B., Jucker, T., Valladares, F., Jagodzinski, A.M., Peri, P.L., Gonmadje, C., Marthy, W., O'Brien, T., Martin, E.H., Marshall, A.R., Rovero, F., Bitariho, R., Niklaus, P.A., Alvarez-Loayza, P., Chamuya, N., Valencia, R., Mortier, F., Wortel, V., Engone-Obiang, N.L., Ferreira, L.V., Odeke, D.E., Vasquez, R.M., Lewis, S.L., Reich, P.B., 2016. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* (80-.). 354, aaf8957. doi:10.1126/science.aaf8957
- McDowell, N.G., Allen, C.D., Anderson-Teixeira, K., Aukema, B.H., Bond-Lamberty, B., Chini, L., Clark, J.S., Dietze, M., Grossiord, C., Hanbury-Brown, A., Hurtt, G.C., Jackson, R.B., Johnson, D.J., Kueppers, L., Lichstein, J.W., Ogle, K., Poulter, B., Pugh, T.A.M., Seidl, R., Turner, M.G., Uriarte, M., Walker, A.P., Xu, C., 2020. Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world. *Science* (80-.). 368. doi:10.1126/science.aaz9463
- Pan, Y., Birdsey, R. a, Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W. a, Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, a D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S., Hayes, D., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333, 988–93. doi:10.1126/science.1201609
- Ruesch, A., Gibbs, H.K., 2008. New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map For the Year 2000., in: New IPCC Tier-1 Global Biomass Carbon Map For the Year 2000. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem.
- Steidinger, B., Crowther, T., Liang, J., Van Nuland, M., Werner, GD Reich, P., Nabuurs, G., De-Miguel, S., Zhou, M., Picard, N., Herault, B., Zhao, X., Zhang, C., Routh, D., List], [GFBi Author, Peay, K., 2019. Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest tree symbioses. *Nature* in press.

7. Supplementary Information

To select Tropical forest regions, we used the RESOLVE biomes map (Dinerstein et al., 2017). This map is presented below, highlighting only the tropical forest regions.





ETH Zürich

Departement Umweltsystemwissenschaften

Rämistrasse 101

CH - 8092 Zürich