

# **Influential Article Review- Trade Modeling Through Carbon Sequestration, Restoration of Habitats, Equity Allocation Global REDD+ Funds**

**Bennie Fowler**

**Michele Clayton**

**Joan Walton**

*This paper examines biodiversity. We present insights from a highly influential paper. Here are the highlights from this paper: The program on Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD+) is one of the major attempts to tackle climate change mitigation in developing countries. REDD+ seeks to provide result-based incentives to promote emission reductions and increase carbon sinks in forest land while promoting other benefits, such as the conservation of biodiversity. We model different scenarios of international REDD+ funds distribution toward potential recipient countries using 2 carbon emission reduction targets (20% and 50% compared to the baseline scenario, i.e., deforestation and forest degradation without REDD+) by 2030. The model combines the prioritization of environmental outcomes in terms of carbon sequestration and biodiversity conservation and social equity, accounting for the equitable distribution of international REDD+ funds. Results highlight the synergy between carbon sequestration and biodiversity conservation under alternative fund allocation criteria, especially for scenarios of low carbon emission reduction. Trade-offs increase when distributional equity is considered as an additional criterion, especially under higher equity requirements. The analysis helps to better understand the inherent trade-offs between enhancing distributional equity and meeting environmental targets under alternative REDD+ fund allocation options. For our overseas readers, we then present the insights from this paper in Spanish, French, Portuguese, and German.*

*Keywords: climate change, REDD+, trade-offs, biodiversity, equity*

## **SUMMARY**

- The interactions between the SDGs, especially among climate action and others such as life on land, and reducing social inequalities, is an issue of increasing debate, but quantifying trade-offs across these SDGs in a spatially explicit way has been elusive.
- Within conservation science prioritizing the allocation of global conservation efforts is a recurrent topic.
- We suggest that the correlation decreases as carbon emissions are abated beyond ~20% relative to the business-as-usual scenario while also confirming that the relationship between optimal carbon abatement and biodiversity conservation is nonlinear.

- Most of the existing studies that link carbon and biodiversity objectives do not take into consideration social outcomes of potential interventions, including via REDD+. This has the potential to undermine conservation projects, as could happen if equity is not explicitly considered in climate and biodiversity governance.
- Achieving successful REDD+ implementation requires a certain institutional environment within countries and poverty challenges can undermine REDD+ outcomes.
- It is thus necessary to address the underlying causes of deforestation, which are often related to poverty and weak institutional context and governance. Incorporating equity in REDD+ fund negotiations might also imply bringing countries with potentially less developed institutions and larger inequalities within them into the REDD+ arena.

## HIGHLY INFLUENTIAL ARTICLE

We used the following article as a basis of our evaluation:

Palomo, I., Dujardin, Y., Midler, E., Robin, M., Sanz, M. J., & Pascual, U. (2019). Modeling trade-offs across carbon sequestration, biodiversity conservation, and equity in the distribution of global REDD+ funds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(45), 22645–22650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1908683116>

This is the link to the publisher’s website:

<https://www.pnas.org/content/116/45/22645>

## INTRODUCTION

Planning toward meeting environmental goals requires the integration of ecological and social aspects. However, social aspects related to conservation decisions have been particularly elusive. Among these aspects, social equity, one of the pillars of the Sustainable Development Goals (SDGs), stands as a key political criterion. However, efforts to effectively integrate equity considerations into environmental goals have been limited. Only recently integrated modeling approaches have been able to show how addressing equity might affect biodiversity conservation goals and climate mitigation targets. These are 2 of the most pressing global policy issues of our time and can have feedback effects on economic inequality.

Deforestation and forest degradation currently account for up to 10% of the global greenhouse gas emissions. Avoiding deforestation and forest degradation is generally seen as a relatively low-cost abatement option as well as critical element to reduce biodiversity loss. The international program about Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation (REDD+) was created by the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) in 2007 at the 13th Conference of the Parties. The program has continuously evolved in order to promote environmental benefits, and it introduces social safeguards, reflected in the “plus,” including the role of conservation and sustainable management of forests, and enhancement of forest carbon stocks.

All this has resulted in a complex financial landscape. Several initiatives focus on the readiness process to scale up REDD+, and so far, REDD+ has mainly focused on a so-called “phase I,” consisting in developing a global strategy, supported by financial grants, that include creating guidelines, capacity development at country level, and strengthening forest-monitoring approaches. Currently, several developing countries have finished phase I and are starting phase II, which consists in the implementation of national policies or action plans. Only a few countries are in the position of receiving “phase III” results-based payments (RBPs) through bilateral and multilateral processes. The Green Climate Fund (GCF) has already raised over 10 billion US\$ from 43 state governments (a call of 500 million US\$ was recently opened in 2018), and, according to the 2015 Paris Agreement, the GCF “expects” to mobilize 100 billion US\$ per year by 2020.

Although the focus of REDD+ is on carbon, there is increased interest in its associated co-benefits and trade-offs. Previous work on global REDD+ fund allocation estimated that including biodiversity as a criterion for the RBP allocation would significantly protect species richness without compromising “carbon efficiency”. However, the REDD+ program has also raised various concerns, especially regarding social aspects such as how REDD+ might affect social equity in its various dimensions. This question is particularly important because potential REDD+ country beneficiaries with a high proportion of their rural population in poverty are also highly vulnerable to the impacts of climate change.

Social equity is a key political component in climate negotiations and climate governance planning. However, the incorporation of distributional equity in REDD+ fund allocation analysis to evaluate trade-offs and synergies with carbon efficiency at the global scale is lacking. This is also a knowledge gap regarding biodiversity conservation studies, as there are relatively few quantitative assessments on how the incorporation of social equity as an allocative criterion of global biodiversity conservation funds might affect global conservation outcomes. From the 3 main dimensions of social equity (recognition, procedural and distributional equity), we focus here on distributional equity impacts of REDD+ allocation rules, to evaluate its potential trade-offs with carbon sequestration and biodiversity conservation.

Implementing environmentally effective, economically efficient and socially equitable (3E+) REDD+ faces multiple challenges. Here, we present a global model based on the reference point method that allows the evaluation of different international REDD+ funds allocation scenarios considering carbon emission reduction from avoiding deforestation (scenario 1), biodiversity conservation (scenario 2), and the implementation of distributional equity rules (scenario 3). The model is run for the 3 scenarios with total budgets associated with carbon emission reduction of 20% and 50% compared to the baseline scenario, i.e., deforestation and forest degradation without REDD+. The model is based on multi-objective linear programming formulations developed at country level (Materials and Methods and SI Appendix). We evaluate how the incorporation of biodiversity conservation and distributional equity targets creates synergies and trade-offs that can impact on carbon emission reduction outcomes. We explored 2 alternative equity rules: a “max–min” rule that prioritizes the allocation of REDD+ funds to the poorest countries (scenario 3A), given the higher vulnerability of poor countries to the impacts of climate change; and an “egalitarian” distributional equity rule based on distributing international REDD+ funds equally among all potential recipient countries (scenario 3B).

## RESULTS

### **Synergies between Forest-Based Carbon Emission Reduction and Biodiversity Conservation.**

The results of scenario 1, maximization of carbon sequestration (for a given REDD+ budget, obtaining the highest possible carbon sequestration globally), and scenario 2, maximization of biodiversity conservation (for a given REDD+ budget, achieving the highest possible number of species conserved globally), are shown in Fig. 1. Scenario 1 (blue line) and scenario 2 (red line) show a strong correlation, suggesting potential for synergetic outcomes in different international REDD+ fund allocation scenarios. The proximity among the curves suggests that the extra financial cost of optimizing biodiversity conservation is moderate. For small reductions in carbon emissions (i.e., carbon emissions reduced by less than 20%), biodiversity co-benefits can be achieved at relatively low economic costs. For a reduction of global forest carbon emissions larger than 20%, carbon and biodiversity are still correlated but the costs of obtaining biodiversity co-benefits are higher.

The estimated REDD+ budget required for a global reduction in carbon emissions of 20% and 50% with respect to a business as usual scenario (i.e., no REDD+), and the number of endemic species that would be lost in each of the REDD+ fund allocation scenarios is shown in Table 1. The model suggests that for a global reduction of carbon emissions of 20%, maximizing biodiversity conservation (i.e., conserving the highest possible number of species globally) would cost 86% more than if REDD+ only focused on abating forest carbon emissions, that is, without taking biodiversity conservation into account as a side objective. Optimizing the allocation of funds to also maximize biodiversity co-benefits while reducing by 20% emissions from deforestation and forest degradation would allow saving of 20% more birds, 17% more

amphibians, and 29% more mammals compared to a “carbon-only” REDD scenario 1. For a 50% carbon emission reduction target, the cost of maximizing biodiversity conservation is more than 2 times the cost of not considering biodiversity as a side objective, but the number of species that would be saved would increase significantly (Table 1).

### **Trade-Offs across Carbon Emission Reduction, Biodiversity Conservation, and Social Equity.**

The effects of including equity considerations in the distribution of REDD+ funds are shown in Fig. 2 for the 2 fixed budgets that correspond to carbon emissions reduction of 20% and 50% as regards scenario 1. The baseline (black curve) indicates the relation between biodiversity conservation and carbon emission reduction without any consideration for distributional equity. Any point within the curve corresponds to an optimized solution for carbon and biodiversity. Considering equity to a small extent, that is, distributing a small share of the total budget across countries based on an equity rule ( $E = 0.25$ ; implying 25% of the budget being distributed according to fulfilling an equity rule; green curve), would not lead to a major loss in carbon emission reduction or biodiversity conservation, as the green curve is relatively close to the black curve and has a similar shape. However, when the majority of funds are distributed following an equity rule instead of environmental criteria (i.e.,  $E = 0.75$ ; yellow curve), this would imply a higher trade-off between carbon and biodiversity objectives, as reducing forest carbon emissions would imply larger biodiversity losses due to the steep concave shape of the curve. Both for a large budget (Fig. 2A) and low budget (Fig. 2B), maximizing equity ( $E = 1$ ) results in significantly higher carbon emissions and biodiversity loss.

The relative loss of carbon efficiency and of biodiversity conservation when incorporating different levels of equity in the distribution of REDD+ funds among countries are shown in Fig. 3. In both cases (for a reduction target of 20% and 50% in forest carbon emissions), relatively small increases in distributional equity ( $E = 0.25$ ) are associated with a relatively small increase in carbon emissions and biodiversity loss. In contrast, when funds are allocated considering solely equity criteria, large losses in carbon efficiency and species conservation emerge. For a REDD+ budget equivalent to 20% carbon emissions reduction, considering equity at the level  $E = 1$  would lead to a scenario in which carbon emissions would only be reduced by 5% (instead of 20% if no equity rule was considered), and the percentage of species lost compared to a scenario without REDD+ would increase from 72 to 87%. For the larger REDD+ budget associated with a 50% forest carbon emission reduction, total prioritization of equity ( $E = 1$ ) would imply that carbon emissions be reduced by 16% (instead of 50%), and the percentage of species lost compared to the baseline scenario would be 75% (instead of 53%).

### **Scenarios of Global REDD+ Funds Allocation across Countries for Carbon, Biodiversity, and Equity.**

The optimized distribution of international REDD+ funds given a low and high budget levels for the 3 scenarios: scenario 1 (maximization of carbon emission reduction), scenario 2 (maximization of biodiversity conservation), scenario 3A (application of a “max–min distribution rule” with countries receiving a share of total REDD+ funds based on their relative income poverty levels, with a fixed equity level at  $E = 0.25$ ), and scenario 3B (the “egalitarian distribution rule” with a share of the total budget distributed equally among all potential receiving countries, with  $E = 0.25$ ) is shown in Fig. 4. In the case of the lower REDD+ budget under scenario 1, the model selects first those countries with the highest ratio of deforestation and carbon density to forest conservation opportunity costs, resulting in the selection of several African countries such as Tanzania, Mozambique, Guinea, Namibia, Zimbabwe, as well as Argentina in South America (Fig. 4A). For the same emissions reduction target, under scenario 2, the model selects a few more countries, including Honduras, Madagascar, Seychelles, Colombia, and Mauritius, which are considered biodiversity hot spots (Fig. 4B). In the case of using the larger budget, the model covers up to 13 countries, both under scenario 1 (Fig. 4C) and scenario 2 (Fig. 4D). The main difference between both scenarios is that, when biodiversity is maximized (Fig. 4D), the model selects more countries from South and Latin America such as Colombia, Mexico, Ecuador, and Panama, which contain very high biodiversity levels. The incorporation of an equity criterion implies a larger number of recipient countries, 50 under the max–min approach (Fig. 4E) and 51 under the egalitarian approach (Fig. 4F). The main difference between these 2 allocative models is that, under the egalitarian distributive approach, the funds are more evenly distributed across countries, while under the max–min approach, poorer countries, such as

Bangladesh, India, Madagascar, Nigeria, and Seychelles, receive a relatively larger share of the total REDD+ budget.

## DISCUSSION

The interactions between the SDGs, especially among climate action (SDG 13) and others such as life on land (SDG 15), and reducing social inequalities (SDG 10), is an issue of increasing debate, but quantifying trade-offs across these SDGs in a spatially explicit way has been elusive. Within conservation science prioritizing the allocation of global conservation efforts is a recurrent topic. Here, we present the results of a model with performance guarantees associated with alternative fund allocation options, which includes ecological and social aspects simultaneously (carbon, biodiversity, and equity). Including equity (under 2 different distributional rules, i.e., max–min and egalitarian rules) results in the selection of a larger number of fund-recipient countries, which is aligned with the inclusive spirit of the UNFCCC. This also allows our model to select more countries to protect endemism and profiting from the high slope of the species-area relationship across different countries, even in cases in which the amount of allocated land under REDD+ program in some countries might be relatively small. Our results contribute to the debate about the extent of trade-offs between climate change mitigation, biodiversity conservation, and social equity under multilateral environmental efforts and policies. Considering different equity rules leads to rather different outcomes, confirming the need to transparently set political criteria underpinning equity and fairness in global REDD+ funds allocation. Such transparency should help deal with ethical dilemmas in allocation decisions of policy makers in the fields of biodiversity conservation and climate change.

Allocation of REDD+ funds for forest conservation demands making hard decisions, especially involving countries with high development priorities. Transparent analytical models, which can present synergies and trade-offs between ecological and societal objectives, are thus necessary to inform decisions over budget allocation options. Our model can be run quickly (~5 min for computation under average computer power), allowing participatory processes to jointly assess trade-offs with decision makers and other stakeholder groups with different interests and identify cost-effective and socially acceptable fund allocation options.

Our main results concur with previous studies that forest carbon emission reduction potential and biodiversity conservation are positively correlated (38), although this correlation does vary. We suggest that the correlation decreases as carbon emissions are abated beyond ~20% relative to the business-as-usual scenario while also confirming that the relationship between optimal carbon abatement and biodiversity conservation is nonlinear.

Most of the existing studies that link carbon and biodiversity objectives do not take into consideration social outcomes of potential interventions, including via REDD+. This has the potential to undermine conservation projects, as could happen if equity is not explicitly considered in climate and biodiversity governance. The distribution of international REDD+ funds without proper account of distributional equity concerns held by potential recipient countries may result in politically unacceptable outcomes that may question the fairness of global institutions from an environmental justice perspective. This could be the case if no measures are adopted before large countries that can cope with the important readiness costs begin to receive REDD+ funds from international donors. Some big REDD+ countries such as Brazil are already well advanced in their progress toward starting to receive them.

The transparent consideration of equity in the distribution of conservation funds as well as assessing the outcomes in terms of carbon efficiency and biodiversity conservation is increasingly needed in conservation practice. The “frontier solutions” in which trade-offs are minimized are also present in our study at relatively low levels of equity. However, it is also worth noting that while carbon inefficiencies in the short term may increase as distributional equity increases, the model is not capable of envisaging second-order effects of considering equity in the longer term, given that efficiency and equity are likely interdependent in the medium to the longer term via political processes.

Our model shows that the explicit incorporation of distributional equity in the way REDD+ funds are allocated could lead to a larger number of recipient countries, thus, if adequately implemented, contributing

in many poor countries to covering the readiness implementation gap. For species-based biodiversity conservation, previous studies have found that distributing funds across a larger number of species can provide better outcomes. However, the prior preparation by some countries before receiving any result-based payment is a key element in order to achieve equitable outcomes under REDD+. Achieving successful REDD+ implementation requires a certain institutional environment within countries and poverty challenges can undermine REDD+ outcomes. It is thus necessary to address the underlying causes of deforestation, which are often related to poverty and weak institutional context and governance. Incorporating equity in REDD+ fund negotiations might also imply bringing countries with potentially less developed institutions and larger inequalities within them into the REDD+ arena. Here, it is fundamental to respect REDD+ safeguards, such as the Rights of Indigenous Peoples. There is a fund-absorption capacity of countries to use REDD+ funds, which our model does not account for. In this regard, previous experiences have found that countries needed twice the time estimated to absorb the funds given different absorption capacities.

Various assumptions affect the results of the model and indicate the need for further research. First, we used the Global Forest Assessment data from the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) for forest cover and forested protected areas, although in this database each country provides data based on a different definition of forest and missing values are completed by extrapolation. We assumed economic opportunity costs of forest conservation at country level without considering spatial variations within countries. However, this should not affect significantly trade-offs at the global scale considering the large number of countries included in the study. Unfortunately, without spatially explicit data on opportunity costs, we were not able to indicate the exact location of forest protection in each country. Further studies using spatially explicit opportunity costs would probably allocate funds to a larger number of countries, as some parts of countries would have lower opportunity costs than the average we used for each country. Last, new research should also focus on assessing the extent to which more equitable approaches, despite resulting in carbon and biodiversity inefficiencies in the short term, could in the medium to longer term catalyze more effective, legitimate, and sustainable REDD+ processes within a larger number of countries and therefore be more successful toward meeting the SDGs.

## **MATERIALS AND METHODS**

Identifying the best possible allocation of funds considering carbon sequestration, biodiversity conservation, and equity requires doing optimal planning according to a precise model that includes areas dynamics (available land for deforestation and protected area), protected areas' implementation costs, and criteria (carbon, biodiversity, and equity) expressions formulations (functions of available land and protected areas). Having several criteria demands generating Pareto frontiers (the set of all existing Pareto efficient allocations) given different REDD+ budgets. Given this model, finding an optimal planning is a hard task because the number of all possible planning is infinite. To tackle this problem, we developed a multiobjective optimization model, based on a linear programming approach, that provides optimal solutions within less than 1% of errors (more details in SI Appendix). In our model, the opportunity costs per country determined the cost of implementing protected areas and equivalates the funds received by each country. Conversely to previous studies, we did not use a single-objective optimization heuristic to generate solutions, but a multiobjective exact optimization approach, so we did not need to reimplement the solutions afterward as the guarantee that our approach is optimal (within 1% of error) is provided by the modeling approach. The various datasets used to feed the optimization model are described in the following lines.

### **Deforestation.**

We used the latest dataset from the Global Forest Resource Assessment from the FAO for information on forest cover, above ground biomass and surface of forest protected for the years 1990, 2000, 2005, 2010, and 2015 per country. With this data, we estimated the deforestation rate in each country and we projected it using an exponential smoothing algorithm to obtain the deforestation rates for the period 2016 to 2030. To estimate carbon emissions, we used the carbon density of above-ground biomass per country from the FAO.

**Biodiversity.**

To compute the main parameters of the biodiversity conservation criteria expression, we evaluated the number of species going extinct in various deforestation scenarios, as done in previous studies. We used the numbers of endemic forest dwelling species of birds, mammals, and amphibians in every country that were provided by the International Union for the Conservation of Nature (IUCN).

**Opportunity Costs.**

Opportunity costs were used to estimate the cost of setting aside a certain amount of land as protected area (and therefore protected from deforestation). Since there are not any robust global estimates of spatially explicit opportunity costs, we used the agricultural opportunity cost as a proxy variable. To estimate the average agricultural opportunity costs in each country from 2001 to 2013, we used the countries' gross value of agricultural production (in 2017 US dollar values) and the agricultural areas in each country (in hectares) of the FAO. We then projected these values to estimate future opportunity costs using an exponential smoothing algorithm.

**Poverty.**

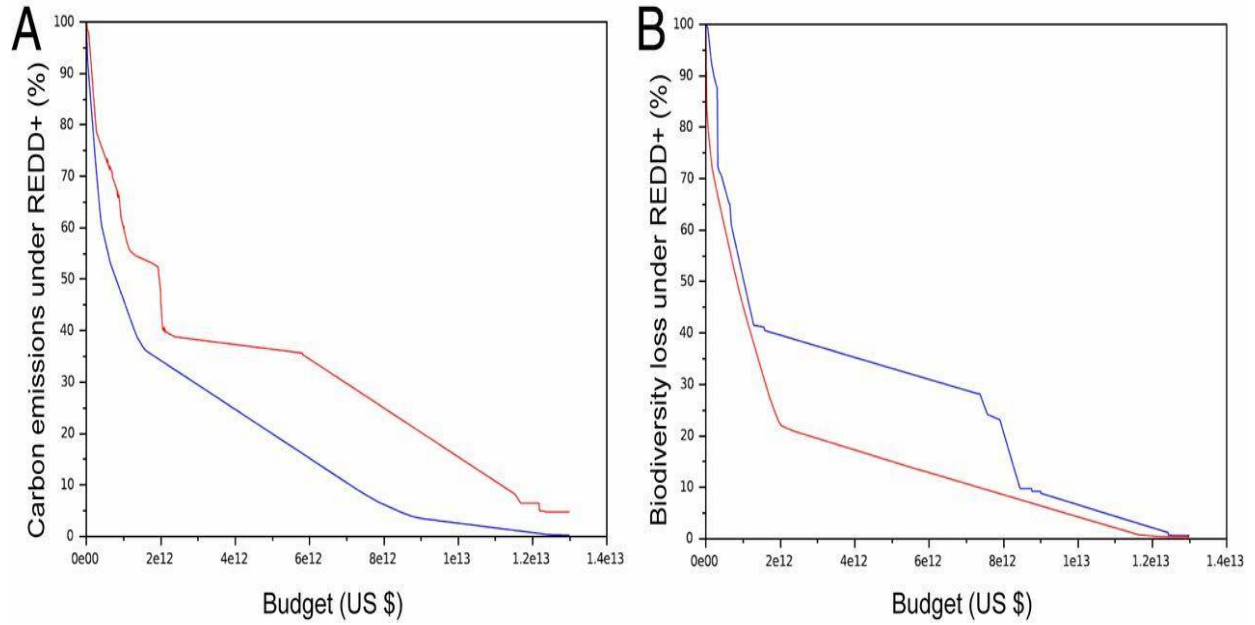
We took the number of people living below 1.90 purchasing power parity dollars per day in each country as a proxy for poverty, which we used to assign funds to different countries under the max–min equity rule. We used the last value available in the World Bank Database since 2006 for each country. Then we estimated the percentage of poor population living in each selected country.

**Eligible Countries.**

The countries eligible to receive REDD+ funds were the nonannex 1 countries of the UNFCCC. Since poverty, opportunity costs, forest protected areas, carbon density, and biodiversity data were not available for all of the eligible countries, we excluded further countries from the analysis, mostly small island countries. A total of 51 countries was included in the final dataset. None of the major emitter countries was excluded. The model description and operation are described in SI Appendix.

APPENDIX

FIGURE 1



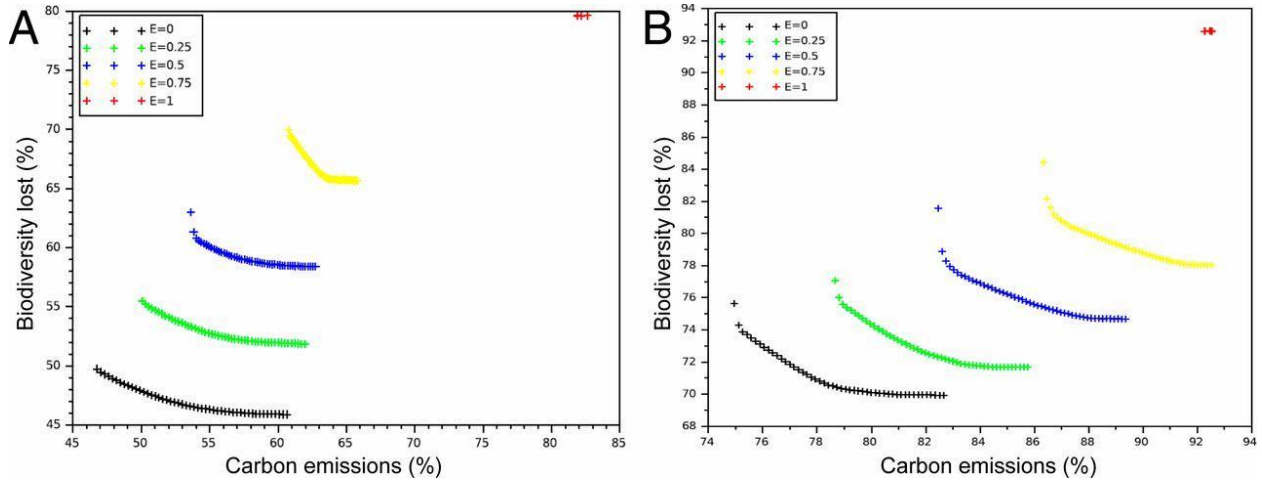
**TABLE 1**  
**MODEL RESULTS IN TERMS OF CARBON EMISSIONS AND BIODIVERSITY LOSS PER YEAR ACROSS REDD+ BUDGET OPTIMIZATION SCENARIOS**

REDD+	Scenarios	No. of bird species lost per year, % birds lost relative to the baseline	No. of amphibian species lost per year, % amphibians lost relative to the baseline	No. of mammal species lost per year, % mammals lost relative to the baseline	Billion tons of forest carbon emissions per year, % of total emission relative to the baseline	Total funds required, billion US\$
Yes	Scenario 1 for a 20% carbon emissions reduction	7 (93.75)	17 (76.39)	7 (90.44)	2.17 (80.15)	220
Yes	Scenario 2 for a 20% carbon emissions reduction	5 (72.48)	12 (59.18)	5 (61.61)	2.16 (80.14)	410
Yes	Scenario 1 for a 50% carbon emissions reduction	5 (67.56)	9 (48.49)	4 (47.59)	1.36 (50.10)	970
Yes	Scenario 2 for a 50% carbon emissions reduction	3 (42.17)	4 (21.05)	2 (27.62)	1.38 (50.86)	2,000
No	Baseline (BAU)	8 (100)	22 (100)	8 (100)	2.71 (100)	0

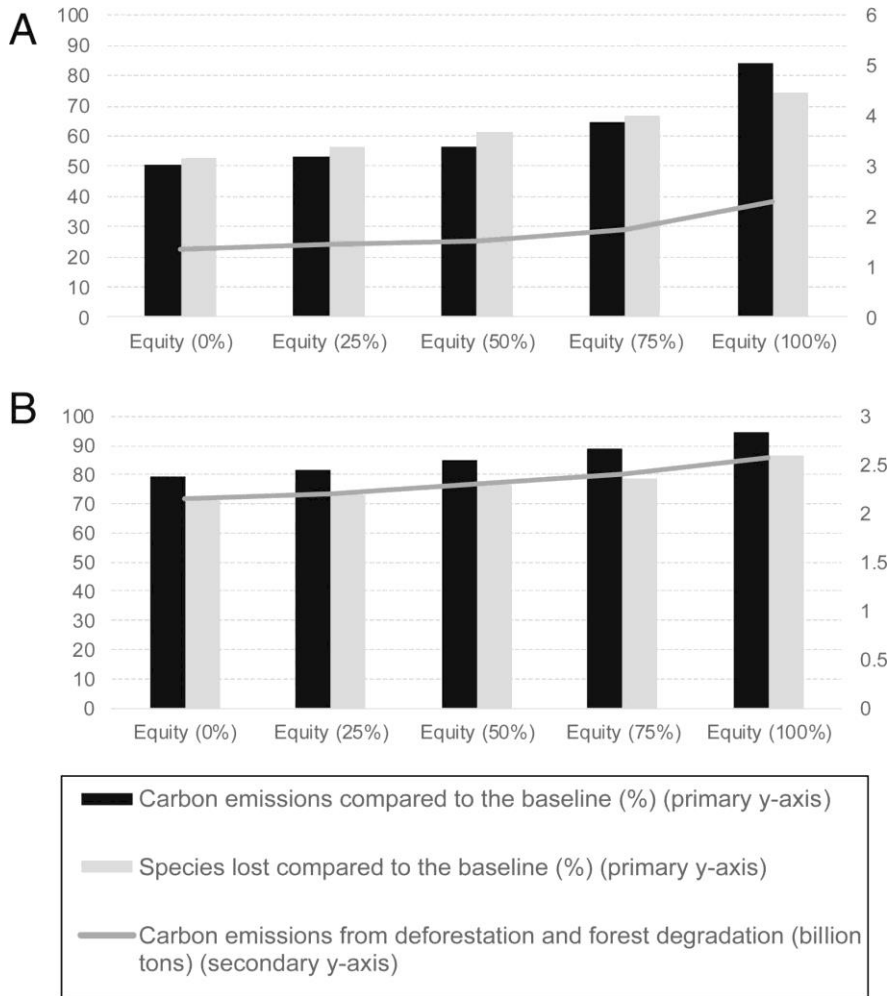
Scenario 1 (maximization of carbon sequestration) and scenario 2 (maximization of biodiversity conservation) for global REDD+ budgets associated with 20% and 50% carbon emissions reductions. Biodiversity impacts are measured in terms of the number of lost species of birds, amphibians, and mammals. The bottom row represents the baseline scenario, in which the REDD+ program is not implemented. BAU, business as usual.



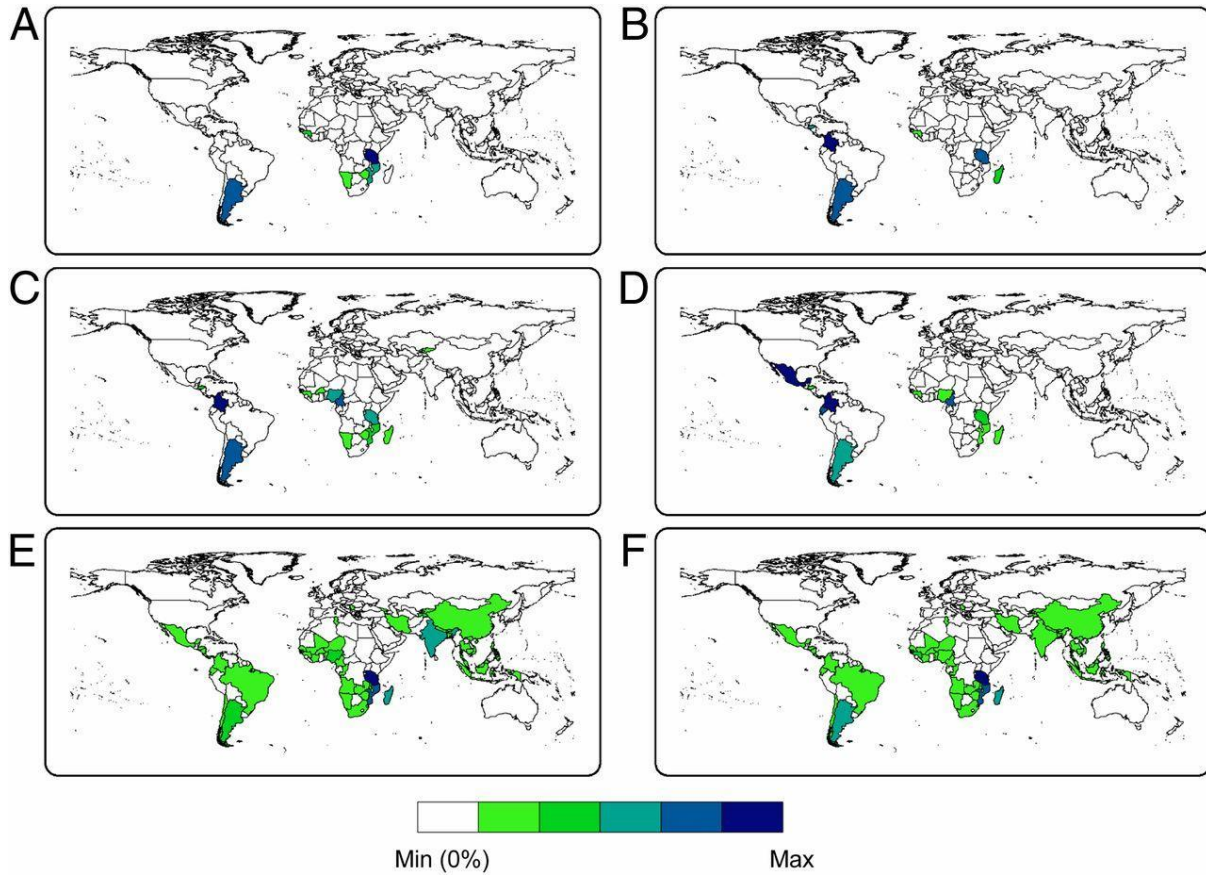
**FIGURE 2**



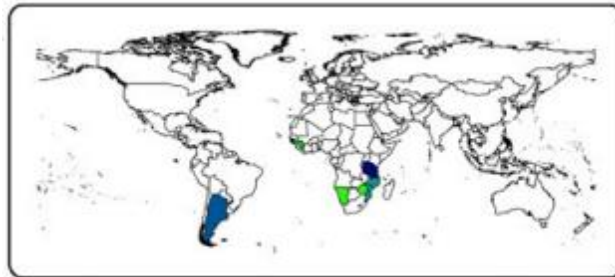
**FIGURE 3**



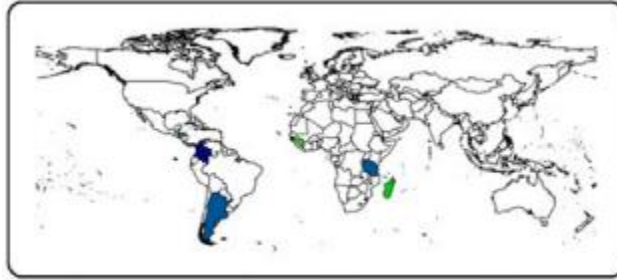
**FIGURE 4**



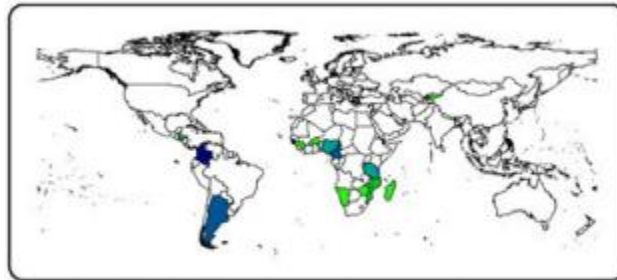
**FIGURE 4A**



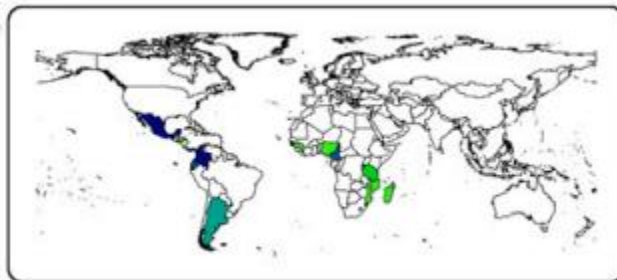
**FIGURE 4B**



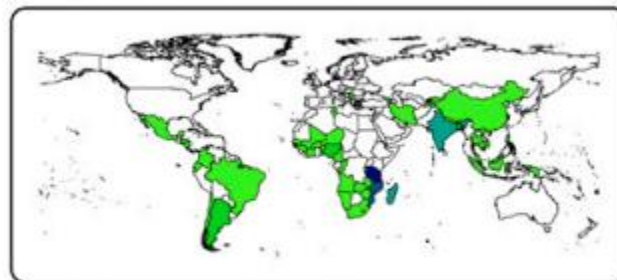
**FIGURE 4C**



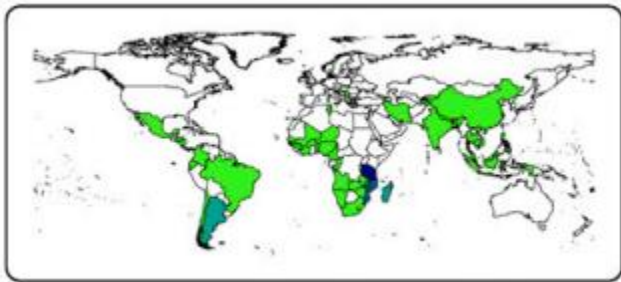
**FIGURE 4D**



**FIGURE 4E**



**FIGURE 4F**



## REFERENCES

- A. Chhatre et al., Social safeguards and co-benefits in REDD+: A review of the adjacent possible. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 654–660 (2012).
- B. B. Strassburg et al., Global congruence of carbon storage and biodiversity in terrestrial ecosystems. *Conserv. Lett.* 3, 98–105 (2010).
- B. S. Halpern et al., Achieving the triple bottom line in the face of inherent trade-offs among social equity, economic return, and conservation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110, 6229–6234 (2013).
- B. W. Miller, S. C. Caplow, P. W. Leslie, Feedbacks between conservation and social-ecological systems. *Conserv. Biol.* 26, 218–227 (2012).
- C. J. Brown et al., Effective conservation requires clear objectives and prioritizing actions, not places or species. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 112, E4342 (2015).
- C. Klein, M. C. McKinnon, B. T. Wright, H. P. Possingham, B. S. Halpern, Social equity and the probability of success of biodiversity conservation. *Glob. Environ. Change* 35, 299–306 (2015).
- C. White, B. S. Halpern, C. V. Kappel, Ecosystem service tradeoff analysis reveals the value of marine spatial planning for multiple ocean uses. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 109, 4696–4701 (2012).
- E. A. Law et al., Equity trade-offs in conservation decision making. *Conserv. Biol.* 32, 294–303 (2018).
- E. Corbera, H. Schroeder, Governing and implementing REDD+. *Environ. Sci. Policy* 14, 89–99 (2011).
- E. Ostrom, A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science* 325, 419–422 (2009).
- E. Turnhout et al., Envisioning REDD+ in a post-Paris era: Between evolving expectations and current practice. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* 8, e425 (2017).
- F. F. Nerini et al., Connecting climate action with other sustainable development goals. *Nat. Sustainability* 2, 674–680 (2019).
- G. Kindermann et al., Global cost estimates of reducing carbon emissions through avoided deforestation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 105, 10302–10307 (2008).
- H. Schroeder, C. McDermott, Beyond carbon: Enabling justice and equity in REDD+ across levels of governance. *Ecol. Soc.* 19, 31 (2014).
- I. J. Visseren-Hamakers, C. McDermott, M. J. Vijge, B. Cashore, Trade-offs, co-benefits and safeguards: Current debates on the breadth of REDD+. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 646–653 (2012).
- J. Barlow et al., Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation. *Nature* 535, 144–147 (2016).
- J. Ferreira et al., Carbon-focused conservation may fail to protect the most biodiverse tropical forests. *Nat. Clim. Chang.* 8, 744–749 (2018).
- J. Pelletier, N. Horning, N. Laporte, R. A. Samndong, S. Goetz, Anticipating social equity impacts in REDD+ policy design: An example from the Democratic Republic of Congo. *Land Use Policy* 75, 102–115 (2018).
- K. A. Wilson, M. F. McBride, M. Bode, H. P. Possingham, Prioritizing global conservation efforts. *Nature* 440, 337–340 (2006).
- K. Lawlor, E. Weinthal, L. Olander, Institutions and policies to protect rural livelihoods in REDD+ regimes. *Glob. Environ. Polit.* 10, 1–11 (2010).
- L. Cui, Y. Huang, Exploring the schemes for Green Climate Fund financing: International lessons. *World Dev.* 101, 173–187 (2018).
- L. Peskett, D. Huberman, E. Bowen-Jones, G. Edwards, J. Brown, Making REDD work for the poor: A poverty environment partnership (PEP) policy brief. <https://portals.iucn.org/library/node/9718>. Accessed 7 October 2019.
- L. R. Gerber, Conservation triage or injurious neglect in endangered species recovery. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 113, 3563–3566 (2016).
- M. Di Marco, J. E. M. Watson, D. J. Currie, H. P. Possingham, O. Venter, The extent and predictability of the biodiversity-carbon correlation. *Ecol. Lett.* 21, 365–375 (2018).
- M. J. Sanz, J. Penman, An overview of REDD+. *Unasylva* 67, 21–30 (2016).

- M. Pasgaard, Z. Sun, D. Müller, O. Mertz, Challenges and opportunities for REDD+: A reality check from perspectives of effectiveness, efficiency and equity. *Environ. Sci. Policy* 63, 161–169 (2016).
- N. C. Ban et al., A social-ecological approach to conservation planning: Embedding social considerations. *Front. Ecol. Environ.* 11, 194–202 (2013).
- N. J. Bennett et al., Conservation social science: Understanding and integrating human dimensions to improve conservation. *Biol. Conserv.* 205, 93–108 (2017).
- N. M. Dawson et al., Barriers to equity in REDD+: Deficiencies in national interpretation processes constrain adaptation to context. *Environ. Sci. Policy* 88, 1–9 (2018).
- N. Olson, J. Bishop, *The Financial Costs of REDD: Evidence from Brazil and Indonesia* (IUCN, Gland, Switzerland, 2009), p. 64.
- N. S. Diffenbaugh, M. Burke, Global warming has increased global economic inequality. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 116, 9808–9813 (2019).
- N. Zafra-Calvo et al., Progress toward equitably managed protected areas in Aichi Target 11: A global survey. *Bioscience* 69, 191–197 (2019).
- O. Venter et al., Harnessing carbon payments to protect biodiversity. *Science* 326, 1368 (2009).
- P. R. Ehrlich, P. M. Kareiva, G. C. Daily, Securing natural capital and expanding equity to rescale civilization. *Nature* 486, 68–73 (2012).
- R. A. Samndong, G. Bush, A. Vatn, M. Chapman, Institutional analysis of causes of deforestation in REDD+ pilot sites in the Equateur province: Implication for REDD+ in the Democratic Republic of Congo. *Land Use Policy* 76, 664–674 (2018).
- S. Chomba, J. Kariuki, J. F. Lund, F. Sinclair, Roots of inequity: How the implementation of REDD+ reinforces past injustices. *Land Use Policy* 50, 202–213
- S. Frankhauser, T. K. McDermott, Understanding the adaptation deficit: Why are poor countries more vulnerable to climate events than rich countries? *Glob. Environ. Change* 27, 9–18 (2014).
- S. Klinsky et al., Why equity is fundamental in climate change policy research. *Glob. Environ. Change* 44, 170–173 (2017).
- S. N. Panfil, C. A. Harvey, REDD+ and biodiversity conservation: A review of the biodiversity goals, monitoring methods, and impacts of 80 REDD+ projects. *Conserv. Lett.* 9, 143–150 (2016).
- S. Nakhoda et al., *Climate Finance: Is It Making a Difference. A Review of the Effectiveness of Multilateral Climate Funds* (Overseas Development Institute, London, 2014).
- S. Ngendakumana et al., Institutional dimensions of the developing REDD+ process in Cameroon. *Clim. Policy* 14, 769–787 (2014).
- T. F. Stocker et al. IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, T. F. Stocker et al., Eds. (Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, New York, NY, 2013), p. 1535.
- U. Isyaku, A. A. Arhin, A. P. Asiyambi, Framing justice in REDD+ governance: Centering transparency, equity and legitimacy in readiness implementation in West Africa. *Environ. Conserv.* 44, 212–220 (2017).
- U. Pascual et al., Social equity matters in payments for ecosystem services. *Bioscience* 64, 1027–1036 (2014).
- U. Pascual, R. Muradian, L. C. Rodríguez, A. Duraiappah, Exploring the links between equity and efficiency in payments for environmental services: A conceptual approach. *Ecol. Econ.* 69, 1237–1244 (2010).
- W. Jaung, J. S. Bae, Evaluating socio-economic equity of REDD+ in a rights-based approach: Rapid equity appraisal matrix. *Environ. Sci. Policy* 22, 1–12 (2012).
- W. Steffen et al., Sustainability. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347, 1259855 (2015).
- Y. Dujardin, I. Chadès, Solving multi-objective optimization problems in conservation with the reference point method. *PLoS One* 13, e0190748 (2018).

Y. R. Du Pont et al., Equitable mitigation to achieve the Paris Agreement goals. *Nat. Clim. Chang.* 7, 38–43 (2017).

## **TRANSLATED VERSION: SPANISH**

Below is a rough translation of the insights presented above. This was done to give a general understanding of the ideas presented in the paper. Please excuse any grammatical mistakes and do not hold the original authors responsible for these mistakes.

## **VERSION TRADUCIDA: ESPAÑOL**

A continuación se muestra una traducción aproximada de las ideas presentadas anteriormente. Esto se hizo para dar una comprensión general de las ideas presentadas en el documento. Por favor, disculpe cualquier error gramatical y no responsabilite a los autores originales de estos errores.

## **INTRODUCCIÓN**

La planificación para alcanzar los objetivos ambientales requiere la integración de aspectos ecológicos y sociales. Sin embargo, los aspectos sociales relacionados con las decisiones de conservación han sido particularmente esquivos. Entre estos aspectos, la equidad social, uno de los pilares de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), se erige como criterio político clave. Sin embargo, los esfuerzos para integrar de manera efectiva las consideraciones de equidad en los objetivos ambientales han sido limitados. Solo recientemente los enfoques de modelado integrados han podido mostrar cómo abordar la equidad podría afectar los objetivos de conservación de la biodiversidad y los objetivos de mitigación del clima. Estos son dos de los problemas de política global más urgentes de nuestro tiempo y pueden tener efectos de retroalimentación sobre la desigualdad económica.

La deforestación y la degradación forestal representan actualmente hasta el 10% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero. Evitar la deforestación y la degradación de los bosques generalmente se considera una opción de reducción de costo relativamente bajo, así como un elemento crítico para reducir la pérdida de biodiversidad. El programa internacional sobre Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de los Bosques (REDD +) fue creado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 2007 en la 13ª Conferencia de las Partes. El programa ha evolucionado continuamente con el fin de promover los cobeneficios ambientales e introduce salvaguardas sociales, reflejadas en el “más”, incluido el papel de la conservación y el manejo sostenible de los bosques y la mejora de las reservas de carbono forestal.

Todo esto ha dado lugar a un panorama financiero complejo. Varias iniciativas se centran en el proceso de preparación para ampliar REDD + y, hasta ahora, REDD + se ha centrado principalmente en la denominada “fase I”, que consiste en desarrollar una estrategia global, apoyada por subvenciones financieras, que incluye la creación de directrices, el desarrollo de capacidades en a nivel de país y el fortalecimiento de los enfoques de seguimiento forestal. Actualmente, varios países en desarrollo han finalizado la fase I y están iniciando la fase II, que consiste en la implementación de políticas o planes de acción nacionales. Solo unos pocos países están en condiciones de recibir pagos basados en resultados (RBP) de la “fase III” a través de procesos bilaterales y multilaterales. El Fondo Verde para el Clima (GCF) ya ha recaudado más de 10 mil millones de dólares estadounidenses de 43 gobiernos estatales (se abrió recientemente una convocatoria de 500 millones de dólares estadounidenses en 2018) y, según el Acuerdo de París de 2015, el GCF “espera” movilizar 100 mil millones de dólares estadounidenses por año para 2020.

Si bien el enfoque principal de REDD + está en el carbono, existe un mayor interés en sus cobeneficios y compensaciones asociadas. El trabajo anterior sobre la asignación de fondos de REDD + global estimó que incluir la biodiversidad como criterio para la asignación de RBP protegería significativamente la riqueza de especies sin comprometer la “eficiencia del carbono”. Sin embargo, el programa REDD +

también ha planteado diversas preocupaciones, especialmente en aspectos sociales, como cómo REDD + podría afectar la equidad social en sus diversas dimensiones. Esta pregunta es particularmente importante porque los países beneficiarios potenciales de REDD + con una alta proporción de su población rural en pobreza también son altamente vulnerables a los impactos del cambio climático.

La equidad social es un componente político clave en las negociaciones climáticas y la planificación de la gobernanza climática. Sin embargo, falta la incorporación de equidad distributiva en el análisis de asignación de fondos REDD + para evaluar compensaciones y sinergias con la eficiencia del carbono a escala global. Esta es también una laguna de conocimiento con respecto a los estudios de conservación de la biodiversidad, ya que hay relativamente pocas evaluaciones cuantitativas sobre cómo la incorporación de la equidad social como un criterio de asignación de los fondos de conservación de la biodiversidad global podría afectar los resultados de la conservación global. Desde las 3 dimensiones principales de la equidad social (reconocimiento, equidad procesal y distributiva), nos enfocamos aquí en los impactos de equidad distributiva de las reglas de asignación de REDD +, para evaluar sus posibles compensaciones con el secuestro de carbono y la conservación de la biodiversidad.

La implementación de REDD + ambientalmente eficaz, económicamente eficiente y socialmente equitativa (3E +) enfrenta múltiples desafíos. A continuación, presentamos un modelo global basado en el método del punto de referencia que permite la evaluación de diferentes escenarios internacionales de asignación de fondos REDD + considerando la reducción de emisiones de carbono por evitar la deforestación (escenario 1), la conservación de la biodiversidad (escenario 2) y la implementación de reglas de equidad distributiva. (escenario 3). El modelo se ejecuta para los 3 escenarios con presupuestos totales asociados con la reducción de emisiones de carbono del 20% y 50% en comparación con el escenario de línea base, es decir, deforestación y degradación forestal sin REDD +. El modelo se basa en formulaciones de programación lineal multiobjetivo desarrolladas a nivel de país (Materiales y métodos y Apéndice SI). Evaluamos cómo la incorporación de objetivos de conservación de la biodiversidad y equidad distributiva crea sinergias y compensaciones que pueden afectar los resultados de reducción de emisiones de carbono. Exploramos 2 reglas de equidad alternativas: una regla “máximo-mínimo” que prioriza la asignación de fondos REDD + a los países más pobres (escenario 3A), dada la mayor vulnerabilidad de los países pobres a los impactos del cambio climático; y una regla de equidad distributiva “igualitaria” basada en la distribución equitativa de los fondos REDD + internacionales entre todos los países receptores potenciales (escenario 3B).

## RESULTADOS

### **Sinergias entre la Reducción de Emisiones de Carbono Basada en los Bosques y la Conservación de la Biodiversidad.**

Los resultados del escenario 1, maximización del secuestro de carbono (para un presupuesto REDD + dado, obteniendo el mayor secuestro de carbono posible a nivel mundial), y el escenario 2, maximización de la conservación de la biodiversidad (para un presupuesto REDD + dado, logrando el mayor número posible de especies conservadas a nivel mundial), se muestran en la Fig. 1. El escenario 1 (línea azul) y el escenario 2 (línea roja) muestran una fuerte correlación, lo que sugiere un potencial de resultados sinérgicos en diferentes escenarios internacionales de asignación de fondos REDD +. La proximidad entre las curvas sugiere que el costo financiero adicional de optimizar la conservación de la biodiversidad es moderado. Para pequeñas reducciones en las emisiones de carbono (es decir, las emisiones de carbono se reducen en menos del 20%), los beneficios conjuntos de la biodiversidad pueden lograrse a costos económicos relativamente bajos. Para una reducción de las emisiones globales de carbono forestal superior al 20%, el carbono y la biodiversidad todavía están correlacionados, pero los costos de obtener beneficios colaterales de la biodiversidad son más altos.

El presupuesto estimado de REDD + requerido para una reducción global en las emisiones de carbono del 20% y 50% con respecto a un escenario normal (es decir, sin REDD +), y la cantidad de especies endémicas que se perderían en cada una de las asignaciones de fondos de REDD + Los escenarios se muestran en la Tabla 1. El modelo sugiere que para una reducción global de las emisiones de carbono del



20%, maximizar la conservación de la biodiversidad (es decir, conservar la mayor cantidad posible de especies a nivel mundial) costaría un 86% más que si REDD + solo se enfocara en reducir los bosques emisiones de carbono, es decir, sin tener en cuenta la conservación de la biodiversidad como objetivo colateral. Optimizar la asignación de fondos para maximizar también los beneficios colaterales de la biodiversidad mientras se reducen en un 20% las emisiones de la deforestación y la degradación forestal permitiría ahorrar un 20% más de aves, un 17% más de anfibios y un 29% más de mamíferos en comparación con un escenario REDD de “solo carbono”. 1. Para una meta de reducción de emisiones de carbono del 50%, el costo de maximizar la conservación de la biodiversidad es más de 2 veces el costo de no considerar la biodiversidad como un objetivo secundario, pero la cantidad de especies que se salvarían aumentaría significativamente (Tabla 1).

### **Compensación entre Reducción de Emisiones de Carbono, Conservación de la Biodiversidad y Equidad Social.**

Los efectos de incluir consideraciones de equidad en la distribución de los fondos REDD + se muestran en la Fig.2 para los 2 presupuestos fijos que corresponden a la reducción de emisiones de carbono del 20% y 50% respecto al escenario 1. La línea de base (curva negra) indica la relación entre conservación de la biodiversidad y reducción de las emisiones de carbono sin tener en cuenta la equidad distributiva. Cualquier punto dentro de la curva corresponde a una solución optimizada para carbono y biodiversidad. Si se considera la equidad en pequeña medida, es decir, distribuir una pequeña parte del presupuesto total entre países con base en una regla de equidad ( $E = 0,25$ ; lo que implica que el 25% del presupuesto se distribuye de acuerdo con el cumplimiento de una regla de equidad; curva verde), no conducir a una pérdida importante en la reducción de emisiones de carbono o la conservación de la biodiversidad, ya que la curva verde está relativamente cerca de la curva negra y tiene una forma similar. Sin embargo, cuando la mayoría de los fondos se distribuyen siguiendo una regla de equidad en lugar de criterios ambientales (es decir,  $E = 0,75$ ; curva amarilla), esto implicaría una mayor compensación entre los objetivos de carbono y de biodiversidad, ya que la reducción de las emisiones de carbono forestal implicaría una mayor pérdidas de biodiversidad debido a la forma cóncava pronunciada de la curva. Tanto para un presupuesto grande (Fig. 2A) como para un presupuesto bajo (Fig. 2B), maximizar la equidad ( $E = 1$ ) resulta en emisiones de carbono y pérdida de biodiversidad significativamente más altas.

La pérdida relativa de eficiencia de carbono y de conservación de la biodiversidad al incorporar diferentes niveles de equidad en la distribución de los fondos REDD + entre países se muestra en la Fig. 3. En ambos casos (para una meta de reducción del 20% y 50% en las emisiones de carbono forestal) , aumentos relativamente pequeños en la equidad distributiva ( $E = 0,25$ ) están asociados con un aumento relativamente pequeño en las emisiones de carbono y la pérdida de biodiversidad. Por el contrario, cuando los fondos se asignan considerando únicamente criterios de equidad, surgen grandes pérdidas en la eficiencia del carbono y la conservación de especies. Para un presupuesto de REDD + equivalente al 20% de reducción de las emisiones de carbono, considerar la equidad en el nivel  $E = 1$  conduciría a un escenario en el que las emisiones de carbono solo se reducirían en un 5% (en lugar de un 20% si no se considerara una regla de equidad), y el porcentaje de especies perdidas en comparación con un escenario sin REDD + aumentaría del 72 al 87%. Para el mayor presupuesto de REDD + asociado con una reducción del 50% de las emisiones de carbono forestal, la priorización total de la equidad ( $E = 1$ ) implicaría que las emisiones de carbono se reducirían en un 16% (en lugar de un 50%), y el porcentaje de especies perdidas en comparación con el El escenario de referencia sería 75% (en lugar de 53%).

### **Escenarios de Asignación Global de Fondos REDD + entre Países para el Carbono, la Biodiversidad y la Equidad.**

La distribución optimizada de los fondos internacionales REDD + dados los niveles de presupuesto bajo y alto para los 3 escenarios: escenario 1 (maximización de la reducción de emisiones de carbono), escenario 2 (maximización de la conservación de la biodiversidad), escenario 3A (aplicación de una regla de distribución “máximo-mínimo” con países que reciben una parte del total de fondos REDD + en función de sus niveles de pobreza de ingresos relativos, con un nivel de equidad fijo en  $E = 0,25$ ), y el escenario 3B (la “regla de distribución igualitaria” con una parte del presupuesto total distribuida equitativamente entre todos países receptores potenciales, con  $E = 0,25$ ) se muestra en la Fig. 4. En el caso de un presupuesto

REDD + más bajo en el escenario 1, el modelo selecciona primero aquellos países con la relación más alta de deforestación y densidad de carbono a costos de oportunidad de conservación forestal, lo que resulta en la selección de varios países africanos como Tanzania, Mozambique, Guinea, Namibia, Zimbabwe, así como Argentina en América del Sur (Fig. 4A). Para el mismo objetivo de reducción de emisiones, en el escenario 2, el modelo selecciona algunos países más, incluidos Honduras, Madagascar, Seychelles, Colombia y Mauricio, que se consideran puntos críticos de biodiversidad (Fig. 4B). En el caso de utilizar el mayor presupuesto, el modelo cubre hasta 13 países, tanto en el escenario 1 (Fig. 4C) como en el escenario 2 (Fig. 4D). La principal diferencia entre ambos escenarios es que, cuando se maximiza la biodiversidad (Fig. 4D), el modelo selecciona más países de América del Sur y América Latina como Colombia, México, Ecuador y Panamá, que contienen niveles muy altos de biodiversidad. La incorporación de un criterio de equidad implica un mayor número de países receptores, 50 bajo el enfoque máximo-mínimo (Fig. 4E) y 51 bajo el enfoque igualitario (Fig. 4F). La principal diferencia entre estos dos modelos de asignación es que, bajo el enfoque distributivo igualitario, los fondos se distribuyen de manera más uniforme entre los países, mientras que bajo el enfoque máximo-mínimo, los países más pobres, como Bangladesh, India, Madagascar, Nigeria y Seychelles, recibir una parte relativamente mayor del presupuesto total de REDD +.

## DISCUSIÓN

Las interacciones entre los ODS, especialmente entre la acción climática (ODS 13) y otros como la vida en la tierra (ODS 15) y la reducción de las desigualdades sociales (ODS 10), es un tema de creciente debate, pero cuantificando las compensaciones entre estos ODS. de una manera espacialmente explícita ha sido esquiva. Dentro de la ciencia de la conservación, priorizar la asignación de esfuerzos de conservación global es un tema recurrente. A continuación, presentamos los resultados de un modelo con garantías de desempeño asociadas a opciones alternativas de asignación de fondos, que incluye aspectos ecológicos y sociales simultáneamente (carbono, biodiversidad y equidad). La inclusión de la equidad (bajo 2 reglas de distribución diferentes, es decir, reglas máximas-mínimas e igualitarias) da como resultado la selección de un mayor número de países receptores de fondos, lo cual está alineado con el espíritu inclusivo de la CMNUCC. Esto también permite que nuestro modelo seleccione más países para proteger el endemismo y beneficiarse de la alta pendiente de la relación especie-área en diferentes países, incluso en casos en los que la cantidad de tierra asignada bajo el programa REDD + en algunos países podría ser relativamente pequeña. Nuestros resultados contribuyen al debate sobre el alcance de las compensaciones entre la mitigación del cambio climático, la conservación de la biodiversidad y la equidad social bajo los esfuerzos y políticas ambientales multilaterales. La consideración de diferentes reglas de equidad conduce a resultados bastante diferentes, lo que confirma la necesidad de establecer de manera transparente criterios políticos que respalden la equidad y la justicia en la asignación global de fondos de REDD +. Dicha transparencia debería ayudar a abordar los dilemas éticos en las decisiones de asignación de los responsables políticos en los campos de la conservación de la biodiversidad y el cambio climático.

La asignación de fondos de REDD + para la conservación de los bosques exige tomar decisiones difíciles, especialmente involucrando a países con altas prioridades de desarrollo. Por lo tanto, los modelos analíticos transparentes, que pueden presentar sinergias y compensaciones entre los objetivos ecológicos y sociales, son necesarios para informar las decisiones sobre las opciones de asignación presupuestaria. Nuestro modelo se puede ejecutar rápidamente ( $\sim 5$  min para cálculos con una potencia promedio de computadora), lo que permite que los procesos participativos evalúen conjuntamente las compensaciones con los tomadores de decisiones y otros grupos de partes interesadas con diferentes intereses e identifiquen opciones de asignación de fondos rentables y socialmente aceptables.

Nuestros principales resultados concuerdan con estudios previos de que el potencial de reducción de emisiones de carbono forestal y la conservación de la biodiversidad están correlacionados positivamente (38), aunque esta correlación varía. Sugerimos que la correlación disminuye a medida que las emisiones de carbono se reducen más allá del  $\sim 20\%$  en relación con el escenario de negocios como siempre, al mismo

tiempo que confirmamos que la relación entre la reducción óptima de carbono y la conservación de la biodiversidad no es lineal.

La mayoría de los estudios existentes que vinculan los objetivos de carbono y biodiversidad no toman en consideración los resultados sociales de las posibles intervenciones, incluso a través de REDD +. Esto tiene el potencial de socavar los proyectos de conservación, como podría suceder si la equidad no se considera explícitamente en la gobernanza del clima y la biodiversidad. La distribución de fondos internacionales de REDD + sin tener en cuenta debidamente las preocupaciones sobre la equidad distributiva de los posibles países receptores puede dar lugar a resultados políticamente inaceptables que pueden cuestionar la equidad de las instituciones globales desde una perspectiva de justicia ambiental. Este podría ser el caso si no se adoptan medidas antes de que los países grandes que pueden hacer frente a los importantes costos de preparación comiencen a recibir fondos de REDD + de donantes internacionales. Algunos países grandes de REDD + como Brasil ya están muy avanzados en su progreso para comenzar a recibirlos.

La consideración transparente de la equidad en la distribución de los fondos de conservación, así como la evaluación de los resultados en términos de eficiencia de carbono y conservación de la biodiversidad, es cada vez más necesaria en la práctica de conservación. Las “soluciones de frontera” en las que se minimizan las compensaciones también están presentes en nuestro estudio con niveles de equidad relativamente bajos. Sin embargo, también vale la pena señalar que, si bien las ineficiencias de carbono a corto plazo pueden aumentar a medida que aumenta la equidad distributiva, el modelo no es capaz de prever efectos de segundo orden al considerar la equidad a largo plazo, dado que la eficiencia y la equidad probablemente sean interdependientes en el mediano a largo plazo a través de procesos políticos.

Nuestro modelo muestra que la incorporación explícita de equidad distributiva en la forma en que se asignan los fondos REDD + podría llevar a un mayor número de países receptores, por lo que, si se implementa adecuadamente, contribuiría en muchos países pobres a cubrir la brecha de implementación de la preparación. Para la conservación de la biodiversidad basada en especies, estudios previos han encontrado que la distribución de fondos entre un mayor número de especies puede proporcionar mejores resultados. Sin embargo, la preparación previa por parte de algunos países antes de recibir cualquier pago basado en resultados es un elemento clave para lograr resultados equitativos bajo REDD +. Lograr una implementación exitosa de REDD + requiere un cierto entorno institucional dentro de los países y los desafíos de la pobreza pueden socavar los resultados de REDD +. Por lo tanto, es necesario abordar las causas subyacentes de la deforestación, que a menudo están relacionadas con la pobreza y el contexto institucional y la gobernanza débiles. La incorporación de la equidad en las negociaciones de los fondos REDD + también podría implicar llevar a los países con instituciones potencialmente menos desarrolladas y mayores desigualdades dentro de ellas al ámbito de REDD +. Aquí, es fundamental respetar las salvaguardas de REDD +, como los Derechos de los Pueblos Indígenas. Existe una capacidad de absorción de fondos de los países para utilizar fondos REDD +, que nuestro modelo no tiene en cuenta. En este sentido, experiencias previas han encontrado que los países necesitaban el doble del tiempo estimado para absorber los fondos dadas las diferentes capacidades de absorción.

Varias suposiciones afectan los resultados del modelo e indican la necesidad de más investigación. En primer lugar, utilizamos los datos de la Evaluación mundial de los bosques de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para la cobertura forestal y las áreas protegidas forestales, aunque en esta base de datos cada país proporciona datos basados en una definición diferente de bosque y se completan los valores faltantes por extrapolación. Asumimos los costos de oportunidad económica de la conservación de los bosques a nivel de país sin considerar las variaciones espaciales dentro de los países. Sin embargo, esto no debería afectar significativamente las compensaciones a escala global considerando el gran número de países incluidos en el estudio. Desafortunadamente, sin datos espacialmente explícitos sobre los costos de oportunidad, no pudimos indicar la ubicación exacta de la protección forestal en cada país. Estudios adicionales que utilicen costos de oportunidad espacialmente explícitos probablemente asignarían fondos a un mayor número de países, ya que algunas partes de los países tendrían costos de oportunidad más bajos que el promedio que usamos para cada país. Por último, las nuevas investigaciones también deberían centrarse en evaluar en qué medida enfoques más equitativos ,

a pesar de generar ineficiencias en el carbono y la biodiversidad a corto plazo, podrían catalizar en el mediano a largo plazo procesos REDD + más efectivos, legítimos y sostenibles dentro de un número mayor de los países y, por lo tanto, tener más éxito en el cumplimiento de los ODS.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Identificar la mejor asignación de fondos posible considerando el secuestro de carbono, la conservación de la biodiversidad y la equidad requiere hacer una planificación óptima de acuerdo con un modelo preciso que incluya la dinámica de áreas (tierra disponible para deforestación y área protegida), costos de implementación de áreas protegidas y criterios (carbono, diversidad biológica y equidad) expresiones formulaciones (funciones de la tierra disponible y áreas protegidas). Tener varios criterios exige generar fronteras de Pareto (el conjunto de todas las asignaciones Pareto eficientes existentes) dados diferentes presupuestos de REDD +. Dado este modelo, encontrar una planificación óptima es una tarea difícil porque el número de toda la planificación posible es infinito. Para abordar este problema, desarrollamos un modelo de optimización multiobjetivo, basado en un enfoque de programación lineal, que proporciona soluciones óptimas con menos del 1% de errores (más detalles en el Apéndice SI). En nuestro modelo, los costos de oportunidad por país determinaron el costo de implementación de áreas protegidas y equivalen los fondos recibidos por cada país. A la inversa de estudios anteriores, no utilizamos una heurística de optimización de un solo objetivo para generar soluciones, sino un enfoque de optimización exacta multiobjetivo, por lo que no tuvimos que volver a implementar las soluciones posteriormente como garantía de que nuestro enfoque es óptimo (dentro del 1% de error ) es proporcionado por el enfoque de modelado. Los diversos conjuntos de datos utilizados para alimentar el modelo de optimización se describen en las siguientes líneas.

### **Deforestación .**

Utilizamos el último conjunto de datos de la Evaluación de los recursos forestales mundiales de la FAO para obtener información sobre la cubierta forestal, la biomasa aérea y la superficie de los bosques protegidos durante los años 1990, 2000, 2005, 2010 y 2015 por país. Con estos datos, estimamos la tasa de deforestación en cada país y la proyectamos usando un algoritmo de suavizado exponencial para obtener las tasas de deforestación para el período 2016 a 2030. Para estimar las emisiones de carbono, usamos la densidad de carbono de la biomasa aérea por país. de la FAO.

### **Biodiversidad .**

Para calcular los principales parámetros de la expresión de los criterios de conservación de la biodiversidad, evaluamos el número de especies en extinción en varios escenarios de deforestación, como se hizo en estudios anteriores. Usamos el número de especies endémicas de aves, mamíferos y anfibios que habitan en los bosques en todos los países que fueron proporcionados por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

### **Costos de oportunidad.**

Los costos de oportunidad se utilizaron para estimar el costo de reservar una cierta cantidad de tierra como área protegida (y por lo tanto protegida de la deforestación). Dado que no hay estimaciones globales sólidas de los costos de oportunidad espacialmente explícitos, utilizamos el costo de oportunidad agrícola como una variable proxy. Para estimar los costos de oportunidad agrícolas promedio en cada país de 2001 a 2013, utilizamos el valor bruto de la producción agrícola de los países (en dólares estadounidenses de 2017) y las áreas agrícolas de cada país (en hectáreas) de la FAO. Luego proyectamos estos valores para estimar los costos de oportunidad futuros utilizando un algoritmo de suavizado exponencial.

### **Pobreza .**

Tomamos el número de personas que viven por debajo de 1,90 dólares de paridad de poder adquisitivo por día en cada país como un indicador de la pobreza, que usamos para asignar fondos a diferentes países bajo la regla de equidad máxima-mínima. Utilizamos el último valor disponible en la base de datos del Banco Mundial desde 2006 para cada país. Luego estimamos el porcentaje de población pobre que vive en cada país seleccionado.

### **Países elegibles.**

Los países elegibles para recibir fondos REDD + fueron los países no incluidos en el anexo 1 de la CMNUCC. Dado que los datos sobre pobreza, costos de oportunidad, áreas forestales protegidas, densidad de carbono y biodiversidad no estaban disponibles para todos los países elegibles, excluimos a otros países del análisis, en su mayoría países insulares pequeños. Se incluyó un total de 51 países en el conjunto de datos final. Ninguno de los principales países emisores fue excluido. La descripción y el funcionamiento del modelo se describen en el Apéndice SI.

## **TRANSLATED VERSION: FRENCH**

Below is a rough translation of the insights presented above. This was done to give a general understanding of the ideas presented in the paper. Please excuse any grammatical mistakes and do not hold the original authors responsible for these mistakes.

## **VERSION TRADUITE: FRANÇAIS**

Voici une traduction approximative des idées présentées ci-dessus. Cela a été fait pour donner une compréhension générale des idées présentées dans le document. Veuillez excuser toutes les erreurs grammaticales et ne pas tenir les auteurs originaux responsables de ces erreurs.

## **INTRODUCTION**

La planification en vue d'atteindre les objectifs environnementaux nécessite l'intégration des aspects écologiques et sociaux. Cependant, les aspects sociaux liés aux décisions de conservation ont été particulièrement insaisissables. Parmi ces aspects, l'équité sociale, l'un des piliers des objectifs de développement durable (ODD), est un critère politique clé. Cependant, les efforts visant à intégrer efficacement les considérations d'équité dans les objectifs environnementaux ont été limités. Seules des approches de modélisation récemment intégrées ont pu montrer comment la prise en compte de l'équité pourrait affecter les objectifs de conservation de la biodiversité et les objectifs d'atténuation du climat. Ce sont deux des questions de politique mondiale les plus urgentes de notre temps et peuvent avoir des effets en retour sur les inégalités économiques.

La déforestation et la dégradation des forêts représentent actuellement jusqu'à 10% des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Éviter la déforestation et la dégradation des forêts est généralement considéré comme une option de réduction relativement peu coûteuse ainsi que comme un élément essentiel pour réduire la perte de biodiversité. Le programme international sur la réduction des émissions dues à la déforestation et à la dégradation des forêts (REDD +) a été créé par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en 2007 lors de la 13e Conférence des Parties. Le programme n'a cessé d'évoluer afin de promouvoir les avantages environnementaux et il introduit des sauvegardes sociales, reflétées dans le «plus», y compris le rôle de la conservation et de la gestion durable des forêts, et l'amélioration des stocks de carbone forestier.

Tout cela a abouti à un paysage financier complexe. Plusieurs initiatives se concentrent sur le processus de préparation à la mise à l'échelle de REDD +, et jusqu'à présent, REDD + s'est principalement concentrée sur une soi-disant «phase I», consistant à développer une stratégie globale, soutenue par des subventions financières, qui comprend la création de lignes directrices, le développement des capacités à au niveau national et le renforcement des approches de suivi des forêts. Actuellement, plusieurs pays en développement ont terminé la phase I et entament la phase II, qui consiste en la mise en œuvre de politiques ou de plans d'action nationaux. Seuls quelques pays sont en mesure de recevoir des paiements fondés sur les résultats (RBP) de «phase III» dans le cadre de processus bilatéraux et multilatéraux. Le Fonds vert pour le climat (FVC) a déjà levé plus de 10 milliards de dollars américains auprès de 43 gouvernements des États (un appel de 500 millions de dollars a été récemment ouvert en 2018), et, selon l'Accord de Paris de 2015, le FVC «espère» 100 milliards US \$ par an d'ici 2020.

Bien que la REDD + se concentre principalement sur le carbone, il y a un intérêt accru pour ses avantages et compromis associés. Des travaux antérieurs sur l'allocation mondiale des fonds REDD + ont estimé que l'inclusion de la biodiversité comme critère d'allocation de RBP protégerait de manière significative la richesse des espèces sans compromettre «l'efficacité carbone». Cependant, le programme REDD + a également soulevé diverses préoccupations, notamment en ce qui concerne les aspects sociaux tels que la façon dont la REDD + pourrait affecter l'équité sociale dans ses diverses dimensions. Cette question est particulièrement importante car les pays bénéficiaires potentiels de la REDD + dont une proportion élevée de leur population rurale est en situation de pauvreté sont également très vulnérables aux impacts du changement climatique.

L'équité sociale est une composante politique clé des négociations sur le climat et de la planification de la gouvernance climatique. Cependant, l'incorporation de l'équité de distribution dans l'analyse d'allocation des fonds REDD + pour évaluer les compromis et les synergies avec l'efficacité carbone à l'échelle mondiale fait défaut. Il s'agit également d'un manque de connaissances concernant les études de conservation de la biodiversité, car il existe relativement peu d'évaluations quantitatives sur la façon dont l'incorporation de l'équité sociale en tant que critère d'allocation des fonds mondiaux de conservation de la biodiversité pourrait affecter les résultats mondiaux de la conservation. A partir des 3 dimensions principales de l'équité sociale (reconnaissance, équité procédurale et distributionnelle), nous nous concentrons ici sur les impacts d'équité distributionnelle des règles d'allocation REDD +, pour évaluer ses compromis potentiels avec la séquestration du carbone et la conservation de la biodiversité.

La mise en œuvre d'une REDD + efficace sur le plan environnemental, économiquement efficace et socialement équitable (3E +) est confrontée à de multiples défis. Ici, nous présentons un modèle global basé sur la méthode du point de référence qui permet l'évaluation de différents scénarios d'allocation de fonds REDD + internationaux prenant en compte la réduction des émissions de carbone en évitant la déforestation (scénario 1), la conservation de la biodiversité (scénario 2) et la mise en œuvre de règles d'équité distributionnelle. (scénario 3). Le modèle est exécuté pour les 3 scénarios avec des budgets totaux associés à une réduction des émissions de carbone de 20% et 50% par rapport au scénario de référence, c'est-à-dire déforestation et dégradation des forêts sans REDD +. Le modèle est basé sur des formulations de programmation linéaire multi-objectifs développées au niveau des pays (Matériels et méthodes et annexe SI). Nous évaluons comment l'intégration des objectifs de conservation de la biodiversité et d'équité de distribution crée des synergies et des compromis qui peuvent avoir un impact sur les résultats de la réduction des émissions de carbone. Nous avons exploré 2 règles d'équité alternatives: une règle «max – min» qui donne la priorité à l'allocation des fonds REDD + aux pays les plus pauvres (scénario 3A), étant donné la plus grande vulnérabilité des pays pauvres aux impacts du changement climatique; et une règle d'équité distributionnelle «égalitaire» basée sur la répartition des fonds internationaux REDD + de manière égale entre tous les pays bénéficiaires potentiels (scénario 3B).

## RÉSULTATS

### **Synergies entre la Réduction des Émissions de Carbone Forestières et la Conservation de la Biodiversité.**

Les résultats du scénario 1, maximisation de la séquestration du carbone (pour un budget REDD + donné, obtention de la séquestration de carbone la plus élevée possible au niveau mondial), et du scénario 2, maximisation de la conservation de la biodiversité (pour un budget REDD + donné, atteindre le plus grand nombre d'espèces conservées dans le monde), sont illustrés à la Fig. 1. Le scénario 1 (ligne bleue) et le scénario 2 (ligne rouge) montrent une forte corrélation, suggérant un potentiel de résultats synergiques dans différents scénarios d'allocation de fonds REDD + internationaux. La proximité entre les courbes suggère que le coût financier supplémentaire de l'optimisation de la conservation de la biodiversité est modéré. Pour de petites réductions des émissions de carbone (c'est-à-dire des émissions de carbone réduites de moins de 20%), les avantages de la biodiversité peuvent être obtenus à des coûts économiques relativement faibles. Pour une réduction des émissions mondiales de carbone forestier supérieure à 20%, le

carbone et la biodiversité sont toujours corrélés, mais les coûts d'obtention des avantages de la biodiversité sont plus élevés.

Le budget REDD + estimé nécessaire pour une réduction globale des émissions de carbone de 20% et 50% par rapport à un scénario de statu quo (c'est-à-dire pas de REDD +), et le nombre d'espèces endémiques qui seraient perdues dans chacune des allocations de fonds REDD + Les scénarios sont présentés dans le tableau 1. Le modèle suggère que pour une réduction globale des émissions de carbone de 20%, maximiser la conservation de la biodiversité (c'est-à-dire conserver le plus grand nombre possible d'espèces au niveau mondial) coûterait 86% de plus que si REDD + se concentrait uniquement sur la réduction des forêts. les émissions de carbone, c'est-à-dire sans prendre en compte la conservation de la biodiversité comme objectif secondaire. Optimiser l'allocation des fonds pour maximiser également les avantages de la biodiversité tout en réduisant de 20% les émissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts permettrait de sauver 20% plus d'oiseaux, 17% plus d'amphibiens et 29% plus de mammifères par rapport à un scénario REDD «carbone uniquement» 1. Pour un objectif de réduction des émissions de carbone de 50%, le coût de la maximisation de la conservation de la biodiversité est plus de 2 fois le coût de ne pas considérer la biodiversité comme un objectif secondaire, mais le nombre d'espèces qui seraient sauvées augmenterait considérablement (tableau 1).

### **Compromis entre la Réduction des Émissions de Carbone, la Conservation de la Biodiversité et L'équité Sociale.**

Les effets de l'inclusion de considérations d'équité dans la distribution des fonds REDD + sont illustrés dans la Fig.2 pour les 2 budgets fixes qui correspondent à une réduction des émissions de carbone de 20% et 50% en ce qui concerne le scénario 1. La ligne de base (courbe noire) indique la relation entre conservation de la biodiversité et réduction des émissions de carbone sans aucune considération pour l'équité de distribution. Tout point de la courbe correspond à une solution optimisée pour le carbone et la biodiversité. Considérer l'équité dans une petite mesure, c'est-à-dire répartir une petite part du budget total entre les pays sur la base d'une règle d'équité ( $E = 0,25$ ; ce qui implique que 25% du budget est distribué conformément à une règle d'équité; courbe verte), serait ne conduisent pas à une perte majeure de réduction des émissions de carbone ou de conservation de la biodiversité, car la courbe verte est relativement proche de la courbe noire et a une forme similaire. Cependant, lorsque la majorité des fonds sont distribués selon une règle d'équité au lieu de critères environnementaux (c.-à-d.  $E = 0,75$ ; courbe jaune), cela impliquerait un compromis plus élevé entre les objectifs de carbone et de biodiversité, car la réduction des émissions de carbone forestier impliquerait une plus grande pertes de biodiversité dues à la forme concave abrupte de la courbe. Tant pour un budget important (Fig. 2A) que pour un budget faible (Fig. 2B), la maximisation de l'équité ( $E = 1$ ) se traduit par des émissions de carbone et une perte de biodiversité significativement plus élevées.

La perte relative d'efficacité carbone et de conservation de la biodiversité lors de l'intégration de différents niveaux d'équité dans la répartition des fonds REDD + entre les pays est illustrée dans la figure 3. Dans les deux cas (pour un objectif de réduction de 20% et 50% des émissions de carbone forestier), des augmentations relativement faibles de l'équité de distribution ( $E = 0,25$ ) sont associées à une augmentation relativement faible des émissions de carbone et de la perte de biodiversité. En revanche, lorsque les fonds sont alloués en tenant uniquement compte des critères d'équité, de grandes pertes d'efficacité carbone et de conservation des espèces apparaissent. Pour un budget REDD + équivalent à 20% de réduction des émissions de carbone, considérer l'équité au niveau  $E = 1$  conduirait à un scénario dans lequel les émissions de carbone ne seraient réduites que de 5% (au lieu de 20% si aucune règle d'équité n'était prise en compte), et le pourcentage d'espèces perdues par rapport à un scénario sans REDD + passerait de 72 à 87%. Pour le budget REDD + plus important associé à une réduction des émissions de carbone forestier de 50%, la priorisation totale de l'équité ( $E = 1$ ) impliquerait que les émissions de carbone soient réduites de 16% (au lieu de 50%), et le pourcentage d'espèces perdues par rapport au le scénario de référence serait de 75% (au lieu de 53%).

### **Scénarios D'allocation des Fonds Mondiaux REDD + entre les Pays Pour le Carbone, la Biodiversité et L'équité.**

La répartition optimisée des fonds internationaux REDD + avec des niveaux de budget bas et élevés pour les 3 scénarios: scénario 1 (maximisation de la réduction des émissions de carbone), scénario 2 (maximisation de la conservation de la biodiversité), scénario 3A (application d'une règle de distribution «max – min » Avec les pays recevant une part du total des fonds REDD + en fonction de leurs niveaux de pauvreté relative des revenus, avec un niveau de fonds propres fixe à  $E = 0,25$ ), et le scénario 3B (la « règle de répartition égalitaire » avec une part du budget total répartie également entre tous dans le cas du budget REDD + inférieur du scénario 1, le modèle sélectionne d'abord les pays ayant le ratio le plus élevé de déforestation et de densité de carbone aux coûts d'opportunité de conservation des forêts, ce qui dans la sélection de plusieurs pays africains tels que la Tanzanie, le Mozambique, la Guinée, la Namibie, le Zimbabwe, ainsi que l'Argentine en Amérique du Sud (Fig. 4A). Pour le même objectif de réduction des émissions, dans le scénario 2, le modèle sélectionne quelques pays supplémentaires, dont le Honduras, Madagascar, les Seychelles, la Colombie et Maurice, qui sont considérés comme des points chauds de la biodiversité (Fig. 4B). Dans le cas de l'utilisation d'un budget plus important, le modèle couvre jusqu'à 13 pays, à la fois dans le scénario 1 (Fig. 4C) et dans le scénario 2 (Fig. 4D). La principale différence entre les deux scénarios est que, lorsque la biodiversité est maximisée (figure 4D), le modèle sélectionne plus de pays d'Amérique du Sud et d'Amérique latine tels que la Colombie, le Mexique, l'Équateur et le Panama, qui contiennent des niveaux de biodiversité très élevés. L'incorporation d'un critère d'équité implique un plus grand nombre de pays bénéficiaires, 50 sous l'approche max – min (Fig. 4E) et 51 sous l'approche égalitaire (Fig. 4F). La principale différence entre ces 2 modèles d'allocation est que, dans le cadre de l'approche distributive égalitaire, les fonds sont répartis plus uniformément entre les pays, tandis que dans l'approche max-min, les pays plus pauvres, comme le Bangladesh, l'Inde, Madagascar, le Nigéria et les Seychelles, recevoir une part relativement plus importante du budget total REDD +.

## DISCUSSION

Les interactions entre les ODD, en particulier entre l'action climatique (ODD 13) et d'autres tels que la vie sur terre (ODD 15), et la réduction des inégalités sociales (ODD 10), sont un sujet de débat croissant, mais quantifiant les compromis entre ces ODD d'une manière spatialement explicite a été insaisissable. Au sein de la science de la conservation, donner la priorité à l'attribution des efforts mondiaux de conservation est un sujet récurrent. Nous présentons ici les résultats d'un modèle avec des garanties de performance associées à des options d'allocation de fonds alternatives, qui intègre simultanément les aspects écologiques et sociaux (carbone, biodiversité et équité). L'inclusion de l'équité (selon 2 règles de répartition différentes, c'est-à-dire les règles max-min et égalitaires) aboutit à la sélection d'un plus grand nombre de pays bénéficiaires de fonds, ce qui est conforme à l'esprit inclusif de la CCNUCC. Cela permet également à notre modèle de sélectionner plus de pays pour protéger l'endémisme et de profiter de la forte pente de la relation espèce-aire dans différents pays, même dans les cas où la quantité de terres allouées dans le cadre du programme REDD + dans certains pays pourrait être relativement faible. Nos résultats contribuent au débat sur l'étendue des compromis entre l'atténuation du changement climatique, la conservation de la biodiversité et l'équité sociale dans le cadre des efforts et politiques environnementaux multilatéraux. La prise en compte de règles d'équité différentes conduit à des résultats assez différents, confirmant la nécessité de définir de manière transparente des critères politiques sous-tendant l'équité et la justice dans l'allocation mondiale des fonds REDD +. Une telle transparence devrait aider à résoudre les dilemmes éthiques dans les décisions d'allocation des décideurs dans les domaines de la conservation de la biodiversité et du changement climatique.

L'allocation de fonds REDD + pour la conservation des forêts exige la prise de décisions difficiles, en particulier en impliquant les pays ayant des priorités de développement élevées. Des modèles analytiques transparents, qui peuvent présenter des synergies et des compromis entre les objectifs écologiques et sociaux, sont donc nécessaires pour éclairer les décisions sur les options d'allocation budgétaire. Notre modèle peut être exécuté rapidement ( ~ 5 min pour un calcul avec une puissance informatique moyenne), ce qui permet aux processus participatifs d'évaluer conjointement les compromis avec les décideurs et



d'autres groupes de parties prenantes ayant des intérêts différents et d'identifier des options d'allocation de fonds rentables et socialement acceptables.

Nos principaux résultats concordent avec les études précédentes selon lesquelles le potentiel de réduction des émissions de carbone forestier et la conservation de la biodiversité sont positivement corrélés (38), bien que cette corrélation varie. Nous suggérons que la corrélation diminue à mesure que les émissions de carbone sont diminuées au-delà de ~ 20% par rapport au scénario business-as-usual tout en confirmant que la relation entre la réduction du carbone optimale et la conservation de la biodiversité est non linéaire.

La plupart des études existantes qui lient les objectifs carbone et biodiversité ne prennent pas en compte les résultats sociaux des interventions potentielles, y compris via REDD +. Cela a le potentiel de saper les projets de conservation, comme cela pourrait arriver si l'équité n'est pas explicitement prise en compte dans la gouvernance du climat et de la biodiversité. La distribution de fonds internationaux REDD + sans tenir dûment compte des préoccupations d'équité de distribution des pays bénéficiaires potentiels peut aboutir à des résultats politiquement inacceptables qui peuvent remettre en cause l'équité des institutions mondiales du point de vue de la justice environnementale. Cela pourrait être le cas si aucune mesure n'est adoptée avant que les grands pays capables de faire face aux importants coûts de préparation ne commencent à recevoir des fonds REDD + de donateurs internationaux. Certains grands pays REDD + comme le Brésil sont déjà bien avancés dans leurs progrès pour commencer à les recevoir.

La prise en compte transparente de l'équité dans la distribution des fonds de conservation ainsi que l'évaluation des résultats en termes d'efficacité carbone et de conservation de la biodiversité sont de plus en plus nécessaires dans les pratiques de conservation. Les «solutions frontalières» dans lesquelles les compromis sont minimisés sont également présentes dans notre étude à des niveaux d'équité relativement bas. Cependant, il convient également de noter que si les inefficacités carbone à court terme peuvent augmenter à mesure que l'équité de distribution augmente, le modèle n'est pas capable d'envisager des effets de second ordre de la prise en compte de l'équité à plus long terme, étant donné que l'efficacité et l'équité sont probablement interdépendantes, moyen à long terme via des processus politiques.

Notre modèle montre que l'incorporation explicite de l'équité distributive dans la manière dont les fonds REDD + sont alloués pourrait conduire à un plus grand nombre de pays bénéficiaires, donc, si elle est correctement mise en œuvre, contribuer dans de nombreux pays pauvres à combler le déficit de mise en œuvre. Pour la conservation de la biodiversité basée sur les espèces, des études antérieures ont montré que la distribution de fonds à un plus grand nombre d'espèces peut fournir de meilleurs résultats. Cependant, la préparation préalable par certains pays avant de recevoir un paiement basé sur les résultats est un élément clé pour obtenir des résultats équitables dans le cadre de REDD +. Pour réussir la mise en œuvre de la REDD +, il faut un environnement institutionnel au sein des pays et les problèmes de pauvreté peuvent compromettre les résultats de REDD +. Il est donc nécessaire de s'attaquer aux causes sous-jacentes de la déforestation, qui sont souvent liées à la pauvreté et à la faiblesse du contexte institutionnel et de la gouvernance. L'intégration de l'équité dans les négociations sur les fonds REDD + pourrait également impliquer d'amener des pays avec des institutions potentiellement moins développées et des inégalités plus importantes en leur sein dans l'arène REDD +. Ici, il est fondamental de respecter les garanties REDD +, telles que les droits des peuples autochtones. Il existe une capacité d'absorption des fonds des pays à utiliser les fonds REDD +, dont notre modèle ne tient pas compte. À cet égard, les expériences antérieures ont montré que les pays avaient besoin de deux fois le temps estimé pour absorber les fonds compte tenu des différentes capacités d'absorption.

Diverses hypothèses affectent les résultats du modèle et indiquent la nécessité de poursuivre les recherches. Premièrement, nous avons utilisé les données de l'Évaluation mondiale des forêts de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) pour le couvert forestier et les aires protégées forestières, bien que dans cette base de données chaque pays fournisse des données basées sur une définition différente de la forêt et les valeurs manquantes sont complétées par extrapolation. Nous avons supposé les coûts d'opportunité économiques de la conservation des forêts au niveau national sans tenir compte des variations spatiales au sein des pays. Cependant, cela ne devrait pas affecter de manière significative les compromis à l'échelle mondiale compte tenu du grand nombre de pays inclus dans

l'étude. Malheureusement, sans données spatialement explicites sur les coûts d'opportunité, nous n'avons pas été en mesure d'indiquer l'emplacement exact de la protection des forêts dans chaque pays. D'autres études utilisant des coûts d'opportunité spatialement explicites alloueraient probablement des fonds à un plus grand nombre de pays, car certaines parties de pays auraient des coûts d'opportunité inférieurs à la moyenne que nous avons utilisée pour chaque pays. Enfin, les nouvelles recherches devraient également se concentrer sur l'évaluation de la mesure dans laquelle des approches plus équitables, bien qu'elles entraînent des inefficacités en matière de carbone et de biodiversité à court terme, pourraient à moyen et long terme catalyser des processus REDD + plus efficaces, légitimes et durables au sein d'un plus grand nombre de pays et donc mieux réussir à atteindre les ODD.

## **MATÉRIAUX ET MÉTHODES**

Identifier la meilleure allocation possible des fonds en tenant compte de la séquestration du carbone, de la conservation de la biodiversité et de l'équité nécessite une planification optimale selon un modèle précis qui inclut la dynamique des zones (terres disponibles pour la déforestation et les aires protégées), les coûts de mise en œuvre des aires protégées et les critères (carbone, la biodiversité et l'équité) les formulations d'expressions (fonctions des terres disponibles et des aires protégées). Avoir plusieurs critères exige de générer des frontières de Pareto (l'ensemble de toutes les allocations efficaces de Pareto existantes) compte tenu des différents budgets REDD +. Compte tenu de ce modèle, trouver une planification optimale est une tâche difficile car le nombre de toutes les planifications possibles est infini. Pour résoudre ce problème, nous avons développé un modèle d'optimisation multiobjectifs, basé sur une approche de programmation linéaire, qui fournit des solutions optimales à moins de 1% des erreurs (plus de détails dans l'Annexe SI). Dans notre modèle, les coûts d'opportunité par pays déterminent le coût de mise en œuvre des aires protégées et équivalent aux fonds reçus par chaque pays. Contrairement aux études précédentes, nous n'avons pas utilisé une heuristique d'optimisation à objectif unique pour générer des solutions, mais une approche d'optimisation exacte multiobjective, nous n'avons donc pas eu besoin de réimplémenter les solutions par la suite car la garantie que notre approche est optimale (à 1% d'erreur) est fournie par l'approche de modélisation. Les différents jeux de données utilisés pour alimenter le modèle d'optimisation sont décrits dans les lignes suivantes.

### **Déforestation .**

Nous avons utilisé le dernier ensemble de données de l'Évaluation des ressources forestières mondiales de la FAO pour obtenir des informations sur le couvert forestier, la biomasse aérienne et la surface des forêts protégées pour les années 1990, 2000, 2005, 2010 et 2015 par pays. Avec ces données, nous avons estimé le taux de déforestation dans chaque pays et nous l'avons projeté à l'aide d'un algorithme de lissage exponentiel pour obtenir les taux de déforestation pour la période 2016 à 2030. Pour estimer les émissions de carbone, nous avons utilisé la densité de carbone de la biomasse aérienne par pays de la FAO.

### **Biodiversité.**

Pour calculer les principaux paramètres de l'expression des critères de conservation de la biodiversité, nous avons évalué le nombre d'espèces en voie d'extinction dans divers scénarios de déforestation, comme cela a été fait dans les études précédentes. Nous avons utilisé les nombres d'espèces endémiques d'oiseaux, de mammifères et d'amphibiens vivant dans les forêts dans chaque pays qui ont été fournis par l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN).

### **Coûts d'opportunité.**

Les coûts d'opportunité ont été utilisés pour estimer le coût de la mise de côté d'une certaine quantité de terres comme zone protégée (et donc protégée de la déforestation). Puisqu'il n'y a pas d'estimations mondiales robustes des coûts d'opportunité spatialement explicites, nous avons utilisé le coût d'opportunité agricole comme variable proxy. Pour estimer les coûts d'opportunité agricoles moyens dans chaque pays de 2001 à 2013, nous avons utilisé la valeur brute de la production agricole des pays (en dollars américains de 2017) et les superficies agricoles de chaque pays (en hectares) de la FAO. Nous avons ensuite projeté ces valeurs pour estimer les coûts d'opportunité futurs à l'aide d'un algorithme de lissage exponentiel.

### **Pauvreté.**

Nous avons pris le nombre de personnes vivant en dessous de 1,90 dollar de parité de pouvoir d'achat par jour dans chaque pays comme une approximation de la pauvreté, que nous avons utilisée pour attribuer des fonds à différents pays selon la règle d'équité max – min. Nous avons utilisé la dernière valeur disponible dans la base de données de la Banque mondiale depuis 2006 pour chaque pays. Ensuite, nous avons estimé le pourcentage de population pauvre vivant dans chaque pays sélectionné.

### **Pays éligibles.**

Les pays éligibles pour recevoir des fonds REDD + étaient les pays non-annexés 1 de la CCNUCC. Étant donné que la pauvreté, les coûts d'opportunité, les zones forestières protégées, la densité de carbone et les données sur la biodiversité n'étaient pas disponibles pour tous les pays éligibles, nous avons exclu d'autres pays de l'analyse, principalement des petits pays insulaires. Au total, 51 pays ont été inclus dans l'ensemble de données final. Aucun des principaux pays émetteurs n'a été exclu. La description et le fonctionnement du modèle sont décrits dans l'annexe SI.

### **TRANSLATED VERSION: GERMAN**

Below is a rough translation of the insights presented above. This was done to give a general understanding of the ideas presented in the paper. Please excuse any grammatical mistakes and do not hold the original authors responsible for these mistakes.

### **ÜBERSETZTE VERSION: DEUTSCH**

Hier ist eine ungefähre Übersetzung der oben vorgestellten Ideen. Dies wurde getan, um ein allgemeines Verständnis der in dem Dokument vorgestellten Ideen zu vermitteln. Bitte entschuldigen Sie alle grammatikalischen Fehler und machen Sie die ursprünglichen Autoren nicht für diese Fehler verantwortlich.

### **EINFÜHRUNG**

Die Planung zur Erreichung der Umweltziele erfordert die Integration ökologischer und sozialer Aspekte. Soziale Aspekte im Zusammenhang mit Erhaltungsentscheidungen waren jedoch besonders schwer fassbar. Unter diesen Aspekten ist soziale Gerechtigkeit, eine der Säulen der Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs), ein zentrales politisches Kriterium. Die Bemühungen, Gerechtigkeitsaspekte effektiv in Umweltziele zu integrieren, waren jedoch begrenzt. Erst kürzlich konnten integrierte Modellierungsansätze zeigen, wie sich die Berücksichtigung von Gerechtigkeit auf die Ziele zur Erhaltung der biologischen Vielfalt und die Klimaschutzziele auswirken kann. Dies sind zwei der dringendsten globalen politischen Fragen unserer Zeit und können Rückkopplungseffekte auf die wirtschaftliche Ungleichheit haben.

Abholzung und Walddegradation machen derzeit bis zu 10% der weltweiten Treibhausgasemissionen aus. Die Vermeidung von Entwaldung und Walddegradation wird im Allgemeinen als relativ kostengünstige Option zur Bekämpfung und als kritisches Element zur Verringerung des Verlusts der biologischen Vielfalt angesehen. Das internationale Programm zur Reduzierung der Emissionen aus Entwaldung und Waldabbau (REDD +) wurde 2007 auf der 13. Vertragsstaatenkonferenz vom Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) ins Leben gerufen. Das Programm wurde kontinuierlich weiterentwickelt, um ökologische Vorteile zu fördern, und es führt soziale Schutzmaßnahmen ein, die sich im „Plus“ widerspiegeln, einschließlich der Rolle der Erhaltung und nachhaltigen Bewirtschaftung von Wäldern und der Verbesserung der Kohlenstoffvorräte in Wäldern.

All dies hat zu einer komplexen Finanzlandschaft geführt. Mehrere Initiativen konzentrieren sich auf den Bereitschaftsprozess zur Skalierung von REDD +. Bisher konzentrierte sich REDD + hauptsächlich auf eine sogenannte „Phase I“, die aus der Entwicklung einer globalen Strategie besteht, die durch

Finanzhilfen unterstützt wird. Dazu gehören die Erstellung von Richtlinien und der Kapazitätsaufbau bei Länderebene und Stärkung der Waldüberwachungsansätze. Derzeit haben mehrere Entwicklungsländer Phase I abgeschlossen und beginnen Phase II, die in der Umsetzung nationaler Politiken oder Aktionspläne besteht. Nur wenige Länder sind in der Lage, ergebnisbasierte Zahlungen der Phase III (RBP) über bilaterale und multilaterale Prozesse zu erhalten. Der Green Climate Fund (GCF) hat bereits über 10 Milliarden US-Dollar von 43 Landesregierungen aufgebracht (ein Aufruf von 500 Millionen US-Dollar wurde kürzlich im Jahr 2018 eröffnet), und laut dem Pariser Abkommen von 2015 „erwartet“ der GCF eine Mobilisierung Bis 2020 100 Milliarden US-Dollar pro Jahr.

Obwohl der Schwerpunkt von REDD + auf Kohlenstoff liegt, besteht ein erhöhtes Interesse an den damit verbundenen Vorteilen und Kompromissen. Frühere Arbeiten zur globalen Allokation von REDD + -Fonds schätzten, dass die Einbeziehung der biologischen Vielfalt als Kriterium für die RBP-Allokation den Artenreichtum erheblich schützen würde, ohne die „CO<sub>2</sub>-Effizienz“ zu beeinträchtigen. Das REDD + -Programm hat jedoch auch verschiedene Bedenken aufgeworfen, insbesondere in Bezug auf soziale Aspekte wie die Auswirkungen von REDD + auf die soziale Gerechtigkeit in seinen verschiedenen Dimensionen. Diese Frage ist besonders wichtig, da potenzielle Begünstigte von REDD + -Ländern mit einem hohen Anteil ihrer ländlichen Bevölkerung in Armut ebenfalls sehr anfällig für die Auswirkungen des Klimawandels sind.

Soziale Gerechtigkeit ist eine wichtige politische Komponente bei Klimaverhandlungen und bei der Planung der Klimaregierung. Es fehlt jedoch die Einbeziehung von Verteilungskapital in die Analyse der REDD + -Fondsallokation, um Kompromisse und Synergien mit der CO<sub>2</sub>-Effizienz auf globaler Ebene zu bewerten. Dies ist auch eine Wissenslücke in Bezug auf Studien zum Erhalt der biologischen Vielfalt, da es relativ wenige quantitative Bewertungen darüber gibt, wie sich die Einbeziehung von sozialer Gerechtigkeit als Allokationskriterium für globale Fonds zum Erhalt der biologischen Vielfalt auf die globalen Erhaltungsergebnisse auswirken könnte. Ausgehend von den drei Hauptdimensionen der sozialen Gerechtigkeit (Anerkennung, Verfahrens- und Verteilungsgerechtigkeit) konzentrieren wir uns hier auf die Auswirkungen der REDD + -Zuteilungsregeln auf die Verteilungsgerechtigkeit, um die möglichen Kompromisse mit der Kohlenstoffbindung und dem Erhalt der biologischen Vielfalt zu bewerten.

Die Implementierung von umweltfreundlichem, wirtschaftlich effizientem und sozial gerecht (3E +) REDD + steht vor zahlreichen Herausforderungen. Hier präsentieren wir ein globales Modell, das auf der Referenzpunktmethode basiert und die Bewertung verschiedener internationaler REDD + -Fondsallokationsszenarien unter Berücksichtigung der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Vermeidung von Entwaldung (Szenario 1), Erhaltung der biologischen Vielfalt (Szenario 2) und Umsetzung von Verteilungsgleichheitsregeln ermöglicht (Szenario 3). Das Modell wird für die drei Szenarien mit Gesamtbudgets durchgeführt, die mit einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20% und 50% im Vergleich zum Basisszenario verbunden sind, dh Entwaldung und Walddegradation ohne REDD +. Das Modell basiert auf multiobjektiven linearen Programmierformulierungen, die auf Länderebene entwickelt wurden (Materialien und Methoden und SI-Anhang). Wir bewerten, wie die Einbeziehung von Zielen zur Erhaltung der biologischen Vielfalt und zur Verteilung von Gerechtigkeit Synergien und Kompromisse schafft, die sich auf die Ergebnisse der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auswirken können. Wir haben zwei alternative Eigenkapitalregeln untersucht: eine „Max-Min“-Regel, die die Zuweisung von REDD + -Fonds an die ärmsten Länder priorisiert (Szenario 3A), da die armen Länder anfälliger für die Auswirkungen des Klimawandels sind; und eine „egalitäre“ Verteilungsgleichheitsregel, die auf der gleichmäßigen Verteilung internationaler REDD + -Fonds auf alle potenziellen Empfängerländer basiert (Szenario 3B).

## **ERGEBNISSE**

### **Synergien zwischen der Reduzierung der Kohlenstoffemissionen auf Waldbasis und dem Erhalt der biologischen Vielfalt.**

Die Ergebnisse von Szenario 1, Maximierung der Kohlenstoffbindung (für ein gegebenes REDD + -Budget, Erzielung der höchstmöglichen Kohlenstoffbindung weltweit) und Szenario 2, Maximierung der

Erhaltung der biologischen Vielfalt (für ein gegebenes REDD + -Budget, Erreichen der höchstmöglichen Anzahl von Arten, die weltweit konserviert werden ) sind in Abb. 1 dargestellt. Szenario 1 (blaue Linie) und Szenario 2 (rote Linie) weisen eine starke Korrelation auf, was auf ein Potenzial für synergetische Ergebnisse in verschiedenen internationalen REDD + -Fondsallokationsszenarien hindeutet. Die Nähe zwischen den Kurven lässt darauf schließen, dass die zusätzlichen finanziellen Kosten für die Optimierung des Schutzes der biologischen Vielfalt moderat sind. Bei einer geringen Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (dh einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um weniger als 20%) können Vorteile für die biologische Vielfalt bei relativ geringen wirtschaftlichen Kosten erzielt werden. Bei einer Reduzierung der globalen Waldkohlenstoffemissionen um mehr als 20% korrelieren Kohlenstoff und Biodiversität immer noch, aber die Kosten für die Erzielung von Biodiversitäts-Cobenefits sind höher.

Das geschätzte REDD + -Budget, das für eine globale Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20% und 50% in Bezug auf ein Business as usual-Szenario (dh kein REDD +) erforderlich ist, sowie die Anzahl der endemischen Arten, die bei jeder REDD + -Fondsallokation verloren gehen würden Die Szenarien sind in Tabelle 1 dargestellt. Das Modell legt nahe, dass bei einer globalen Reduzierung der Kohlenstoffemissionen um 20% die Maximierung des Schutzes der biologischen Vielfalt (dh die Erhaltung der höchstmöglichen Anzahl von Arten weltweit) 86% mehr kosten würde, als wenn REDD + sich nur auf die Verringerung des Waldes konzentrieren würde Kohlenstoffemissionen, dh ohne Berücksichtigung des Schutzes der biologischen Vielfalt als Nebenziel. Durch die Optimierung der Mittelzuweisung zur Maximierung des Nutzens der biologischen Vielfalt bei gleichzeitiger Reduzierung der Emissionen aus Entwaldung und Walddegradation um 20% könnten 20% mehr Vögel, 17% mehr Amphibien und 29% mehr Säugetiere gerettet werden als in einem REDD-Szenario nur mit Kohlenstoff 1. Bei einem Ziel zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 50% betragen die Kosten für die Maximierung des Erhalts der biologischen Vielfalt mehr als das Zweifache der Kosten, wenn die biologische Vielfalt nicht als Nebenziel betrachtet wird, aber die Anzahl der Arten, die gerettet würden, würde erheblich zunehmen (Tabelle 1).

### **Kompromisse zwischen Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen, Erhaltung der biologischen Vielfalt und sozialer Gerechtigkeit.**

Die Auswirkungen der Einbeziehung von Eigenkapitalüberlegungen in die Verteilung von REDD + -Fonds sind in Abb. 2 für die beiden festen Budgets dargestellt, die einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20% und 50% in Bezug auf Szenario 1 entsprechen. Die Basislinie (schwarze Kurve) gibt die Beziehung zwischen an Erhaltung der biologischen Vielfalt und Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ohne Berücksichtigung der Verteilungsgerechtigkeit. Jeder Punkt innerhalb der Kurve entspricht einer optimierten Lösung für Kohlenstoff und Biodiversität. Wenn man das Eigenkapital in geringem Umfang berücksichtigt, dh einen kleinen Teil des Gesamtbudgets auf der Grundlage einer Eigenkapitalregel auf die Länder verteilt ( $E = 0,25$ ; impliziert, dass 25% des Budgets gemäß der Erfüllung einer Eigenkapitalregel verteilt werden; grüne Kurve), würde dies der Fall sein Dies führt nicht zu einem größeren Verlust bei der Reduzierung der Kohlenstoffemissionen oder beim Erhalt der biologischen Vielfalt, da die grüne Kurve relativ nahe an der schwarzen Kurve liegt und eine ähnliche Form aufweist. Wenn jedoch die Mehrheit der Mittel nach einer Eigenkapitalregel anstelle von Umweltkriterien (dh  $E = 0,75$ ; gelbe Kurve) verteilt wird, würde dies einen höheren Kompromiss zwischen Kohlenstoff- und Biodiversitätszielen bedeuten, da die Reduzierung der Kohlenstoffemissionen im Wald größer wäre Biodiversitätsverluste aufgrund der steilen konkaven Form der Kurve. Sowohl für ein großes Budget (Abb. 2A) als auch für ein niedriges Budget (Abb. 2B) führt die Maximierung des Eigenkapitals ( $E = 1$ ) zu signifikant höheren CO<sub>2</sub>-Emissionen und einem Verlust der biologischen Vielfalt.

Der relative Verlust der CO<sub>2</sub>-Effizienz und des Schutzes der biologischen Vielfalt bei Einbeziehung unterschiedlicher Gerechtigkeit in die Verteilung der REDD + -Fonds auf die Länder ist in Abb. 3 dargestellt. In beiden Fällen (für ein Reduktionsziel von 20% und 50% der Kohlenstoffemissionen im Wald) Ein relativ geringer Anstieg des Verteilungsgleichgewichts ( $E = 0,25$ ) ist mit einem relativ geringen Anstieg der Kohlenstoffemissionen und des Verlusts der biologischen Vielfalt verbunden. Im Gegensatz dazu treten bei der Zuweisung von Mitteln ausschließlich unter Berücksichtigung von Eigenkapitalkriterien große Verluste bei der CO<sub>2</sub>-Effizienz und beim Artenschutz auf. Bei einem REDD + -Budget, das einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 20% entspricht, würde die Berücksichtigung von Eigenkapital auf

der Ebene  $E = 1$  zu einem Szenario führen, in dem die CO<sub>2</sub>-Emissionen nur um 5% reduziert würden (anstelle von 20%, wenn keine Eigenkapitalregel berücksichtigt würde) Der Prozentsatz der verlorenen Arten im Vergleich zu einem Szenario ohne REDD + würde von 72 auf 87% steigen. Für das größere REDD + -Budget, das mit einer Reduzierung der Waldkohlenstoffemissionen um 50% verbunden ist, würde eine vollständige Priorisierung des Eigenkapitals ( $E = 1$ ) bedeuten, dass die Kohlenstoffemissionen um 16% (anstelle von 50%) und der Prozentsatz der verlorenen Arten im Vergleich zum Das Basisszenario wäre 75% (anstelle von 53%).

### **Szenarien der globalen REDD + -Fondsallokation für Kohlenstoff, Biodiversität und Gerechtigkeit in verschiedenen Ländern.**

Die optimierte Verteilung der internationalen REDD + -Fonds bei niedrigem und hohem Budget für die drei Szenarien: Szenario 1 (Maximierung der Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen), Szenario 2 (Maximierung der Erhaltung der biologischen Vielfalt), Szenario 3A (Anwendung einer „Max-Min-Verteilungsregel“ "Mit Ländern, die einen Anteil an den gesamten REDD + -Fonds erhalten, basierend auf ihrer relativen Einkommensarmut, mit einem festen Eigenkapitalniveau von  $E = 0,25$ ) und Szenario 3B (die "egalitäre Verteilungsregel" mit einem Anteil des Gesamtbudgets, der gleichmäßig auf alle verteilt ist Potenzielle Aufnahmeländer mit  $E = 0,25$ ) sind in Abb. 4 dargestellt. Im Fall des niedrigeren REDD + -Budgets in Szenario 1 wählt das Modell zunächst die Länder mit dem höchsten Verhältnis von Entwaldung und Kohlenstoffdichte zu den daraus resultierenden Opportunitätskosten für den Waldschutz aus bei der Auswahl mehrerer afrikanischer Länder wie Tansania, Mosambik, Guinea, Namibia, Simbabwe sowie Argentinien in Südamerika (Abb. 4A). Für das gleiche Emissionsreduktionsziel wählt das Modell unter Szenario 2 einige weitere Länder aus, darunter Honduras, Madagaskar, Seychellen, Kolumbien und Mauritius, die als Brennpunkte der biologischen Vielfalt gelten (Abb. 4B). Bei Verwendung des größeren Budgets deckt das Modell bis zu 13 Länder ab, sowohl unter Szenario 1 (Abb. 4C) als auch unter Szenario 2 (Abb. 4D). Der Hauptunterschied zwischen beiden Szenarien besteht darin, dass das Modell bei Maximierung der Biodiversität (Abb. 4D) mehr Länder aus Süd- und Lateinamerika wie Kolumbien, Mexiko, Ecuador und Panama auswählt, die eine sehr hohe Biodiversität aufweisen. Die Einbeziehung eines Gerechtigkeitskriteriums impliziert eine größere Anzahl von Empfängerländern, 50 nach dem Max-Min-Ansatz (Abb. 4E) und 51 nach dem egalitären Ansatz (Abb. 4F). Der Hauptunterschied zwischen diesen beiden Allokationsmodellen besteht darin, dass die Mittel nach dem egalitären Verteilungsansatz gleichmäßiger auf die Länder verteilt sind, während nach dem Max-Min-Ansatz ärmere Länder wie Bangladesch, Indien, Madagaskar, Nigeria und die Seychellen einen relativ größeren Anteil am gesamten REDD + -Budget erhalten.

## **DISKUSSION**

Die Wechselwirkungen zwischen den SDGs, insbesondere zwischen Klimaschutzmaßnahmen (SDG 13) und anderen wie dem Leben an Land (SDG 15) und der Verringerung sozialer Ungleichheiten (SDG 10), sind ein Thema zunehmender Debatten, aber die Quantifizierung von Kompromissen zwischen diesen SDGs auf räumlich explizite Weise war schwer fassbar. Innerhalb der Naturschutzwissenschaft ist die Priorisierung der Verteilung globaler Naturschutzbemühungen ein wiederkehrendes Thema. Hier präsentieren wir die Ergebnisse eines Modells mit Leistungsgarantien im Zusammenhang mit alternativen Optionen für die Fondsallokation, die gleichzeitig ökologische und soziale Aspekte (Kohlenstoff, Biodiversität und Gerechtigkeit) umfassen. Die Einbeziehung von Eigenkapital (unter zwei verschiedenen Verteilungsregeln, dh Max-Min- und egalitären Regeln) führt zur Auswahl einer größeren Anzahl von Empfängerländern, was dem integrativen Geist des UNFCCC entspricht. Dies ermöglicht es unserem Modell auch, mehr Länder auszuwählen, um den Endemismus zu schützen und von der hohen Steigung der Arten-Flächen-Beziehung zwischen verschiedenen Ländern zu profitieren, selbst in Fällen, in denen die Menge des im Rahmen des REDD + -Programms zugewiesenen Landes in einigen Ländern relativ gering sein könnte. Unsere Ergebnisse tragen zur Debatte über das Ausmaß der Kompromisse zwischen Klimaschutz, Erhaltung der biologischen Vielfalt und sozialer Gerechtigkeit im Rahmen multilateraler Umweltbemühungen und -politiken bei. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Eigenkapitalregeln führt

zu ziemlich unterschiedlichen Ergebnissen, was die Notwendigkeit bestätigt, transparente politische Kriterien festzulegen, die Gerechtigkeit und Fairness bei der globalen Allokation von REDD + -Fonds untermauern. Diese Transparenz sollte dazu beitragen, ethische Dilemmata bei Zuteilungsentscheidungen der politischen Entscheidungsträger in den Bereichen Erhaltung der biologischen Vielfalt und Klimawandel zu bewältigen.

Die Zuweisung von REDD + -Fonds für den Waldschutz erfordert schwierige Entscheidungen, insbesondere unter Einbeziehung von Ländern mit hohen Entwicklungsprioritäten. Transparente Analysemodelle, die Synergien und Kompromisse zwischen ökologischen und gesellschaftlichen Zielen darstellen können, sind daher erforderlich, um Entscheidungen über Optionen für die Mittelzuweisung zu treffen. Unser Modell kann schnell ausgeführt werden (~5 Minuten für die Berechnung unter durchschnittlicher Computerleistung), sodass partizipative Prozesse Kompromisse mit Entscheidungsträgern und anderen Interessengruppen mit unterschiedlichen Interessen gemeinsam bewerten und kostengünstige und sozialverträgliche Optionen für die Mittelzuweisung ermitteln können.

Unsere Hauptergebnisse stimmen mit früheren Studien überein, wonach das Potenzial zur Reduzierung der Kohlenstoffemissionen im Wald und der Erhalt der biologischen Vielfalt positiv korreliert sind (38), obwohl diese Korrelation unterschiedlich ist. Wir schlagen vor, dass die Korrelation nimmt ab, wenn Kohlenstoff-Emissionen über abgeklungen sind ~20% bezogen auf das Business-as-usual -Szenario, während auch bestätigt, dass die Beziehung zwischen optimaler Kohlenstoff Bekämpfung und Erhaltung der biologischen Vielfalt nicht linear ist.

Die meisten bestehenden Studien, die Kohlenstoff- und Biodiversitätsziele miteinander verbinden, berücksichtigen nicht die sozialen Ergebnisse potenzieller Interventionen, auch nicht über REDD +. Dies hat das Potenzial, Naturschutzprojekte zu untergraben, wie dies passieren könnte, wenn Gerechtigkeit bei der Steuerung von Klima und biologischer Vielfalt nicht explizit berücksichtigt wird. Die Verteilung internationaler REDD + -Fonds ohne angemessene Berücksichtigung der Bedenken hinsichtlich der Verteilungsgerechtigkeit potenzieller Empfängerländer kann zu politisch inakzeptablen Ergebnissen führen, die die Fairness globaler Institutionen unter dem Gesichtspunkt der Umweltgerechtigkeit in Frage stellen können. Dies könnte der Fall sein, wenn keine Maßnahmen ergriffen werden, bevor große Länder, die die wichtigen Bereitschaftskosten bewältigen können, REDD + -Mittel von internationalen Gebern erhalten. Einige große REDD + -Länder wie Brasilien sind bereits weit fortgeschritten, um sie zu erhalten.

Die transparente Berücksichtigung von Gerechtigkeit bei der Verteilung von Naturschutzmitteln sowie die Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Effizienz und den Erhalt der biologischen Vielfalt werden in der Naturschutzpraxis zunehmend benötigt. Die „Grenzlösungen“, bei denen Kompromisse minimiert werden, sind in unserer Studie auch bei relativ geringem Eigenkapital vorhanden. Es ist jedoch auch anzumerken, dass die Kohlenstoffineffizienzen zwar kurzfristig mit zunehmendem Verteilungskapital zunehmen können, das Modell jedoch keine Auswirkungen zweiter Ordnung bei der langfristigen Berücksichtigung von Eigenkapital in Betracht ziehen kann, da Effizienz und Eigenkapital wahrscheinlich voneinander abhängig sind mittel- bis langfristig über politische Prozesse.

Unser Modell zeigt, dass die explizite Einbeziehung von Verteilungskapital in die Art und Weise, wie REDD + -Mittel zugewiesen werden, zu einer größeren Anzahl von Empfängerländern führen kann und somit bei angemessener Umsetzung in vielen armen Ländern zur Schließung der Lücke bei der Umsetzung der Bereitschaft beiträgt. Frühere Studien haben ergeben, dass die Verteilung von Mitteln auf eine größere Anzahl von Arten bessere Ergebnisse für die Erhaltung der Artenvielfalt auf Artenbasis erzielen kann. Die vorherige Vorbereitung einiger Länder vor Erhalt einer ergebnisorientierten Zahlung ist jedoch ein Schlüsselement, um unter REDD + gerechte Ergebnisse zu erzielen. Um eine erfolgreiche Implementierung von REDD + zu erreichen, ist ein bestimmtes institutionelles Umfeld in den Ländern erforderlich, und Armutprobleme können die Ergebnisse von REDD + untergraben. Es ist daher notwendig, die zugrunde liegenden Ursachen der Entwaldung anzugehen, die häufig mit Armut und einem schwachen institutionellen Kontext und einer schwachen Regierungsführung zusammenhängen. Die Einbeziehung von Eigenkapital in REDD + -Fondsverhandlungen könnte auch bedeuten, dass Länder mit potenziell weniger entwickelten Institutionen und größeren Ungleichheiten in die REDD + -Arena einbezogen werden. Hier ist es von grundlegender Bedeutung, die REDD + -Sicherungen wie die Rechte

der indigenen Völker zu respektieren. Es gibt eine Fondsabsorptionskapazität von Ländern, um REDD + -Fonds zu verwenden, die unser Modell nicht berücksichtigt. In diesem Zusammenhang haben frühere Erfahrungen gezeigt, dass die Länder bei unterschiedlichen Absorptionskapazitäten doppelt so viel Zeit benötigten, um die Mittel aufzunehmen.

Verschiedene Annahmen beeinflussen die Ergebnisse des Modells und weisen auf den Bedarf an weiterer Forschung hin. Zunächst verwendeten wir die Daten der Global Forest Assessment der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) für die Waldbedeckung und bewaldete Schutzgebiete, obwohl in dieser Datenbank jedes Land Daten bereitstellt, die auf einer anderen Definition des Waldes basieren, und fehlende Werte vervollständigt werden durch Extrapolation. Wir haben wirtschaftliche Opportunitätskosten für den Waldschutz auf Länderebene angenommen, ohne räumliche Unterschiede innerhalb der Länder zu berücksichtigen. Dies sollte jedoch angesichts der großen Anzahl der in die Studie einbezogenen Länder keine wesentlichen Kompromisse auf globaler Ebene beeinflussen. Leider konnten wir ohne räumlich explizite Daten zu Opportunitätskosten nicht den genauen Ort des Waldschutzes in jedem Land angeben. Weitere Studien mit räumlich expliziten Opportunitätskosten würden wahrscheinlich Mittel einer größeren Anzahl von Ländern zuweisen, da einige Teile der Länder niedrigere Opportunitätskosten hätten als der Durchschnitt, den wir für jedes Land verwendet haben. Schließlich sollte sich die neue Forschung auch darauf konzentrieren, zu bewerten, inwieweit gerechtere Ansätze, obwohl sie kurzfristig zu Ineffizienzen bei Kohlenstoff und biologischer Vielfalt führen, mittel- bis langfristig wirksamere, legitimere und nachhaltigere REDD + -Prozesse in einer größeren Anzahl katalysieren könnten von Ländern und daher erfolgreicher bei der Erfüllung der SDGs sein.

## **MATERIALEN UND METHODEN**

Um die bestmögliche Mittelzuweisung unter Berücksichtigung der Kohlenstoffbindung, des Schutzes der biologischen Vielfalt und der Gerechtigkeit zu ermitteln, muss eine optimale Planung nach einem genauen Modell durchgeführt werden, das die Dynamik der Gebiete (verfügbares Land für Entwaldung und Schutzgebiete), die Umsetzungskosten der Schutzgebiete und die Kriterien (Kohlenstoff, Kohlenstoff) umfasst. Formulierungen für Biodiversität und Gerechtigkeit (Funktionen des verfügbaren Landes und der Schutzgebiete). Mehrere Kriterien erfordern die Generierung von Pareto-Grenzen (die Menge aller vorhandenen Pareto-effizienten Zuweisungen) bei unterschiedlichen REDD + -Budgets. Angesichts dieses Modells ist es eine schwierige Aufgabe, eine optimale Planung zu finden, da die Anzahl aller möglichen Planungen unendlich ist. Um dieses Problem anzugehen, haben wir ein multiobjektives Optimierungsmodell entwickelt, das auf einem linearen Programmieransatz basiert und optimale Lösungen innerhalb von weniger als 1% der Fehler bietet (weitere Details im SI-Anhang). In unserem Modell haben die Opportunitätskosten pro Land die Kosten für die Umsetzung von Schutzgebieten bestimmt und entsprechen den von jedem Land erhaltenen Mitteln. Im Gegensatz zu früheren Studien haben wir keine Einzelziel-Optimierungshuristik verwendet, um Lösungen zu generieren, sondern einen multiobjektiven exakten Optimierungsansatz, sodass wir die Lösungen anschließend nicht erneut implementieren mussten, um sicherzustellen, dass unser Ansatz optimal ist (innerhalb von 1% des Fehlers) ) wird durch den Modellierungsansatz bereitgestellt. Die verschiedenen Datensätze, die zum Einspeisen des Optimierungsmodells verwendet werden, werden in den folgenden Zeilen beschrieben.

### **Abholzung**

Wir haben den neuesten Datensatz aus der globalen Bewertung der Waldressourcen der FAO verwendet, um Informationen zur Waldbedeckung, zur oberirdischen Biomasse und zur Waldoberfläche zu erhalten, die für die Jahre 1990, 2000, 2005, 2010 und 2015 pro Land geschützt wurden. Mit diesen Daten haben wir die Entwaldungsrate in jedem Land geschätzt und sie mithilfe eines exponentiellen Glättungsalgorithmus projiziert, um die Entwaldungsraten für den Zeitraum 2016 bis 2030 zu erhalten. Zur Schätzung der Kohlenstoffemissionen haben wir die Kohlenstoffdichte der oberirdischen Biomasse pro Land verwendet von der FAO.

### **Biodiversität**



Um die Hauptparameter des Ausdrucks der Kriterien zur Erhaltung der biologischen Vielfalt zu berechnen, haben wir die Anzahl der ausgestorbenen Arten in verschiedenen Entwaldungsszenarien bewertet, wie dies in früheren Studien durchgeführt wurde. Wir haben die Anzahl der endemischen Waldbewohnerarten von Vögeln, Säugetieren und Amphibien in jedem Land verwendet, die von der Internationalen Union für den Schutz der Natur (IUCN) bereitgestellt wurden.

#### **Opportunitätskosten.**

Opportunitätskosten wurden verwendet, um die Kosten für die Stilllegung einer bestimmten Menge Land als Schutzgebiet (und damit vor Entwaldung geschützt) zu schätzen. Da es keine soliden globalen Schätzungen der räumlich expliziten Opportunitätskosten gibt, haben wir die landwirtschaftlichen Opportunitätskosten als Proxy-Variable verwendet. Um die durchschnittlichen Opportunitätskosten für die Landwirtschaft in jedem Land von 2001 bis 2013 zu schätzen, haben wir den Bruttowert der landwirtschaftlichen Produktion (in US-Dollar-Werten 2017) und die landwirtschaftlichen Flächen in jedem Land (in Hektar) der FAO verwendet. Wir haben diese Werte dann projiziert, um zukünftige Opportunitätskosten mithilfe eines exponentiellen Glättungsalgorithmus abzuschätzen.

#### **Armut .**

Wir haben die Anzahl der Menschen, die in jedem Land unter 1,90 Kaufkraftparitätsdollar pro Tag leben, als Stellvertreter für die Armut herangezogen, mit der wir nach der Max-Min-Eigenkapitalregel Mittel verschiedenen Ländern zugewiesen haben. Wir haben für jedes Land den letzten in der Weltbankdatenbank seit 2006 verfügbaren Wert verwendet. Dann haben wir den Prozentsatz der armen Bevölkerung geschätzt, die in jedem ausgewählten Land lebt.

#### **Geeignete Länder.**

Die Länder, die REDD + -Fonds erhalten konnten, waren die Nicht-Annex-1-Länder des UNFCCC. Da nicht für alle förderfähigen Länder Daten zu Armut, Opportunitätskosten, Waldschutzgebieten, Kohlenstoffdichte und biologischer Vielfalt verfügbar waren, haben wir weitere Länder von der Analyse ausgeschlossen, hauptsächlich kleine Inselstaaten. Insgesamt 51 Länder wurden in den endgültigen Datensatz aufgenommen. Keines der großen Emittentenländer wurde ausgeschlossen. Die Modellbeschreibung und der Betrieb sind im SI-Anhang beschrieben.

### **TRANSLATED VERSION: PORTUGUESE**

Below is a rough translation of the insights presented above. This was done to give a general understanding of the ideas presented in the paper. Please excuse any grammatical mistakes and do not hold the original authors responsible for these mistakes.

### **VERSÃO TRADUZIDA: PORTUGUÊS**

Aqui está uma tradução aproximada das ideias acima apresentadas. Isto foi feito para dar uma compreensão geral das ideias apresentadas no documento. Por favor, desculpe todos os erros gramaticais e não responsabilize os autores originais responsáveis por estes erros.

### **INTRODUÇÃO**

O planejamento para atingir as metas ambientais requer a integração dos aspectos ecológicos e sociais. No entanto, os aspectos sociais relacionados às decisões de conservação têm sido particularmente elusivos. Dentre esses aspectos, a equidade social, um dos pilares dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), se destaca como critério político fundamental. No entanto, os esforços para integrar com eficácia as considerações de equidade às metas ambientais têm sido limitados. Apenas recentemente as abordagens de modelagem integrada têm sido capazes de mostrar como lidar com a equidade pode afetar as metas de conservação da biodiversidade e as metas de mitigação do clima. Essas são duas das questões de política global mais urgentes de nosso tempo e podem ter efeitos de feedback sobre a desigualdade econômica.

O desmatamento e a degradação florestal respondem atualmente por até 10% das emissões globais de gases de efeito estufa. Evitar o desmatamento e a degradação florestal é geralmente visto como uma opção de redução de custo relativamente baixo, bem como um elemento crítico para reduzir a perda de biodiversidade. O programa internacional de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD +) foi criado pela Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) em 2007 na 13ª Conferência das Partes. O programa tem evoluído continuamente para promover benefícios ambientais e apresenta salvaguardas sociais, refletidas no “plus”, incluindo o papel de conservação e manejo sustentável das florestas e aumento dos estoques de carbono florestal.

Tudo isso resultou em um cenário financeiro complexo. Várias iniciativas enfocam o processo de preparação para expandir REDD + e, até agora, REDD + tem se concentrado principalmente na chamada “fase I”, que consiste no desenvolvimento de uma estratégia global, apoiada por doações financeiras, que incluem a criação de diretrizes, desenvolvimento de capacidade em nível nacional e fortalecimento das abordagens de monitoramento. Atualmente, vários países em desenvolvimento concluíram a fase I e estão iniciando a fase II, que consiste na implementação de políticas ou planos de ação nacionais. Apenas alguns países estão em posição de receber pagamentos baseados em resultados (RBPs) da “fase III” por meio de processos bilaterais e multilaterais. O Fundo Verde para o Clima (GCF) já arrecadou mais de 10 bilhões de US \$ de 43 governos estaduais (uma chamada de 500 milhões de US \$ foi aberta recentemente em 2018) e, de acordo com o Acordo de Paris de 2015, o GCF “espera” mobilizar 100 bilhões de US \$ por ano até 2020.

Embora o foco principal de REDD + seja o carbono, há um interesse crescente em seus cobenefícios e compensações associados. O trabalho anterior sobre a alocação de fundos globais de REDD + estimou que incluir a biodiversidade como um critério para a alocação de RBP protegeria significativamente a riqueza de espécies sem comprometer a “eficiência do carbono”. No entanto, o programa REDD + também levantou várias preocupações, especialmente em relação aos aspectos sociais, como a forma como REDD + pode afetar a equidade social em suas várias dimensões. Esta questão é particularmente importante porque os potenciais beneficiários de REDD + com uma alta proporção de sua população rural na pobreza também são altamente vulneráveis aos impactos das mudanças climáticas.

A igualdade social é um componente político chave nas negociações climáticas e no planejamento da governança climática. No entanto, falta a incorporação da equidade distributiva na análise de alocação de fundos de REDD + para avaliar os trade-offs e sinergias com a eficiência do carbono em escala global. Essa também é uma lacuna de conhecimento em relação aos estudos de conservação da biodiversidade, pois há relativamente poucas avaliações quantitativas sobre como a incorporação da equidade social como um critério de alocação de fundos globais para a conservação da biodiversidade pode afetar os resultados da conservação global. A partir das 3 principais dimensões da equidade social (reconhecimento, equidade procedimental e distributiva), focamos aqui nos impactos da equidade distributiva das regras de alocação de REDD +, para avaliar seus possíveis trade-offs com o sequestro de carbono e a conservação da biodiversidade.

A implementação de REDD + ambientalmente eficaz, economicamente eficiente e socialmente equitativo (3E +) enfrenta vários desafios. Aqui, apresentamos um modelo global baseado no método do ponto de referência que permite a avaliação de diferentes cenários de alocação de fundos internacionais de REDD + considerando a redução das emissões de carbono por evitar o desmatamento (cenário 1), conservação da biodiversidade (cenário 2) e a implementação de regras de equidade distributiva (cenário 3). O modelo é executado para os 3 cenários com orçamentos totais associados à redução de emissão de carbono de 20% e 50% em comparação com o cenário de linha de base, ou seja, desmatamento e degradação florestal sem REDD +. O modelo é baseado em formulações de programação linear multiobjetivo desenvolvidas em nível de país (Materiais e Métodos e Apêndice SI). Avaliamos como a incorporação de metas de conservação da biodiversidade e equidade distributiva cria sinergias e compensações que podem impactar os resultados da redução das emissões de carbono. Exploramos 2 regras alternativas de equidade: uma regra “máx-mín” que prioriza a alocação de fundos de REDD + aos países mais pobres (cenário 3A), dada a maior vulnerabilidade dos países pobres aos impactos das mudanças climáticas; e uma regra de

equidade distributiva “igualitária” baseada na distribuição de fundos internacionais de REDD + igualmente entre todos os países beneficiários potenciais (cenário 3B).

## RESULTADOS

### **Sinergias Entre a Redução da Emissão de Carbono com Base na Floresta e a Conservação da Biodiversidade.**

Os resultados do cenário 1, maximização do sequestro de carbono (para um determinado orçamento de REDD +, obtendo o maior sequestro de carbono possível globalmente), e do cenário 2, maximização da conservação da biodiversidade (para um determinado orçamento de REDD +, alcançando o maior número possível de espécies conservadas globalmente), são mostrados na Fig. 1. O cenário 1 (linha azul) e o cenário 2 (linha vermelha) mostram uma forte correlação, sugerindo potencial para resultados sinérgicos em diferentes cenários internacionais de alocação de fundos de REDD +. A proximidade entre as curvas sugere que o custo financeiro extra para otimizar a conservação da biodiversidade é moderado. Para pequenas reduções nas emissões de carbono (ou seja, emissões de carbono reduzidas em menos de 20%), os cobenefícios da biodiversidade podem ser alcançados com custos econômicos relativamente baixos. Para uma redução das emissões globais de carbono florestal maior que 20%, o carbono e a biodiversidade ainda estão correlacionados, mas os custos de obtenção dos co-benefícios da biodiversidade são maiores.

O orçamento estimado de REDD + necessário para uma redução global nas emissões de carbono de 20% e 50% com relação a um cenário de negócios como de costume (ou seja, sem REDD +), e o número de espécies endêmicas que seriam perdidas em cada uma das alocações de fundos de REDD + cenários são mostrados na Tabela 1. O modelo sugere que para uma redução global das emissões de carbono de 20%, maximizar a conservação da biodiversidade (ou seja, conservar o maior número possível de espécies globalmente) custaria 86% mais do que se REDD + focasse apenas no abate de florestas emissões de carbono, ou seja, sem levar em conta a conservação da biodiversidade como objetivo colateral. Otimizar a alocação de fundos para também maximizar os cobenefícios da biodiversidade e, ao mesmo tempo, reduzir em 20% as emissões do desmatamento e degradação florestal permitiria salvar 20% mais pássaros, 17% mais anfíbios e 29% mais mamíferos em comparação com um cenário REDD “somente carbono” 1. Para uma meta de redução de emissões de carbono de 50%, o custo de maximizar a conservação da biodiversidade é mais de 2 vezes o custo de não considerar a biodiversidade como um objetivo secundário, mas o número de espécies que seriam salvas aumentaria significativamente (Tabela 1).

### **Trade-offs Entre Redução de Emissões de Carbono, Conservação da Biodiversidade e Equidade Social.**

Os efeitos da inclusão de considerações de equidade na distribuição de fundos de REDD + são mostrados na Fig. 2 para os 2 orçamentos fixos que correspondem à redução das emissões de carbono de 20% e 50% em relação ao cenário 1. A linha de base (curva preta) indica a relação entre conservação da biodiversidade e redução da emissão de carbono sem qualquer consideração para equidade distributiva. Qualquer ponto dentro da curva corresponde a uma solução otimizada para carbono e biodiversidade. Considerando a equidade em pequena medida, isto é, distribuir uma pequena parcela do orçamento total entre os países com base em uma regra de equidade ( $E = 0,25$ ; implicando que 25% do orçamento seja distribuído de acordo com o cumprimento de uma regra de equidade; curva verde), seria não levar a uma grande perda na redução da emissão de carbono ou na conservação da biodiversidade, visto que a curva verde está relativamente próxima da curva preta e tem formato semelhante. No entanto, quando a maioria dos fundos é distribuída seguindo uma regra de equidade em vez de critérios ambientais (ou seja,  $E = 0,75$ ; curva amarela), isso implicaria em um trade-off mais alto entre objetivos de carbono e biodiversidade, já que reduzir as emissões de carbono florestal implicaria em maiores perdas de biodiversidade devido à forma côncava acentuada da curva. Tanto para um orçamento grande (Fig. 2A) quanto para um orçamento baixo (Fig. 2B), maximizar a equidade ( $E = 1$ ) resulta em emissões de carbono e perda de biodiversidade significativamente maiores.

A perda relativa de eficiência de carbono e de conservação da biodiversidade ao incorporar diferentes níveis de equidade na distribuição de fundos de REDD + entre os países é mostrada na Fig. 3. Em ambos

os casos (para uma meta de redução de 20% e 50% nas emissões de carbono florestal) , aumentos relativamente pequenos na equidade distributiva ( $E = 0,25$ ) estão associados a um aumento relativamente pequeno nas emissões de carbono e perda de biodiversidade. Em contraste, quando os fundos são alocados considerando apenas critérios de equidade, surgem grandes perdas em eficiência de carbono e conservação de espécies. Para um orçamento de REDD + equivalente a 20% de redução das emissões de carbono, considerando a equidade no nível  $E = 1$  levaria a um cenário no qual as emissões de carbono seriam reduzidas apenas em 5% (em vez de 20% se nenhuma regra de equidade fosse considerada), e a porcentagem de espécies perdidas em comparação com um cenário sem REDD + aumentaria de 72 para 87%. Para o maior orçamento de REDD + associado a uma redução de emissão de carbono florestal de 50%, a priorização total da equidade ( $E = 1$ ) implicaria que as emissões de carbono seriam reduzidas em 16% (em vez de 50%), e a porcentagem de espécies perdidas em comparação com o o cenário de linha de base seria 75% (em vez de 53%).

### **Cenários de Alocação Global de Fundos de REDD + entre Países para Carbono, Biodiversidade e Equidade.**

A distribuição otimizada de fundos internacionais de REDD + dados os níveis de orçamento baixo e alto para os 3 cenários: cenário 1 (maximização da redução das emissões de carbono), cenário 2 (maximização da conservação da biodiversidade), cenário 3A (aplicação de uma “regra de distribuição máx-mín.” Com os países recebendo uma parcela dos fundos totais de REDD + com base em seus níveis de pobreza de renda relativa, com um nível de patrimônio fixo em  $E = 0,25$ ), e o cenário 3B (a “regra de distribuição igualitária” com uma parcela do orçamento total distribuída igualmente entre todos potenciais países receptores, com  $E = 0,25$ ) é mostrado na Fig. 4. No caso do orçamento REDD + mais baixo no cenário 1, o modelo seleciona primeiro os países com a maior proporção de desmatamento e densidade de carbono para custos de oportunidade de conservação florestal, resultando na seleção de vários países africanos como a Tanzânia, Moçambique, Guiné, Namíbia, Zimbábue, bem como a Argentina na América do Sul (Fig. 4A). Para a mesma meta de redução de emissões, no cenário 2, o modelo seleciona mais alguns países, incluindo Honduras, Madagascar, Seychelles, Colômbia e Maurício, que são considerados focos de biodiversidade (Fig. 4B). No caso de usar o orçamento maior, o modelo cobre até 13 países, tanto no cenário 1 (Fig. 4C) quanto no cenário 2 (Fig. 4D). A principal diferença entre os dois cenários é que, quando a biodiversidade é maximizada (Fig. 4D), o modelo seleciona mais países da América do Sul e da América Latina, como Colômbia, México, Equador e Panamá, que apresentam níveis de biodiversidade muito altos. A incorporação de um critério de equidade implica um maior número de países destinatários, 50 sob a abordagem max-min (Fig. 4E) e 51 sob a abordagem igualitária (Fig. 4F). A principal diferença entre esses 2 modelos de alocação é que, sob a abordagem distributiva igualitária, os fundos são mais uniformemente distribuídos entre os países, enquanto sob a abordagem max-min, países mais pobres, como Bangladesh, Índia, Madagascar, Nigéria e Seychelles, receber uma parcela relativamente maior do orçamento total de REDD +.

## **DISCUSSÃO**

As interações entre os ODSs, especialmente entre a ação climática (ODS 13) e outras, como a vida na terra (ODS 15) e a redução das desigualdades sociais (ODS 10), é uma questão de debate crescente, mas quantificando os trade-offs entre esses ODS de uma forma espacialmente explícita tem sido elusiva. Dentro da ciência da conservação, priorizar a alocação de esforços globais de conservação é um tópico recorrente. Aqui, apresentamos os resultados de um modelo com garantias de desempenho associadas a opções alternativas de alocação de fundos, que incluem aspectos ecológicos e sociais simultaneamente (carbono, biodiversidade e patrimônio líquido). A inclusão de patrimônio líquido (sob duas regras de distribuição diferentes, ou seja, máximo – mínimo e regras igualitárias) resulta na seleção de um número maior de países receptores de fundos, o que está alinhado com o espírito inclusivo da UNFCCC. Isso também permite que nosso modelo selecione mais países para proteger o endemismo e lucrar com a alta

inclinação da relação espécie-área em diferentes países, mesmo nos casos em que a quantidade de terra alocada sob o programa REDD + em alguns países possa ser relativamente pequena. Nossos resultados contribuem para o debate sobre a extensão dos trade-offs entre mitigação das mudanças climáticas, conservação da biodiversidade e equidade social no âmbito de esforços e políticas ambientais multilaterais. A consideração de diferentes regras de equidade leva a resultados bastante diferentes, confirmando a necessidade de definir critérios políticos transparentes que sustentem a equidade e a justiça na alocação global de fundos de REDD +. Essa transparência deve ajudar a lidar com dilemas éticos nas decisões de alocação de formuladores de políticas nas áreas de conservação da biodiversidade e mudanças climáticas.

A alocação de fundos de REDD + para a conservação florestal exige a tomada de decisões difíceis, especialmente envolvendo países com altas prioridades de desenvolvimento. Modelos analíticos transparentes, que podem apresentar sinergias e trade-offs entre os objetivos ecológicos e sociais, são necessários para informar as decisões sobre as opções de alocação orçamentária. Nosso modelo pode ser executado rapidamente ( ~ 5 min para computação sob o poder médio do computador), permitindo que os processos participativos avaliem em conjunto os trade-offs com os tomadores de decisão e outros grupos de partes interessadas com interesses diferentes e identifiquem opções de alocação de fundos economicamente aceitáveis e socialmente aceitáveis.

Nossos principais resultados concordam com estudos anteriores de que o potencial de redução de emissão de carbono florestal e a conservação da biodiversidade estão positivamente correlacionados (38), embora essa correlação varie. Sugerimos que a correlação diminui à medida que as emissões de carbono são abatidas além de ~ 20% em relação ao cenário business-as-usual, ao mesmo tempo que confirmamos que a relação entre a redução ideal de carbono e a conservação da biodiversidade não é linear.

A maioria dos estudos existentes que relacionam os objetivos do carbono e da biodiversidade não leva em consideração os resultados sociais de intervenções potenciais, inclusive via REDD +. Isso tem o potencial de minar os projetos de conservação, como poderia acontecer se a equidade não fosse considerada explicitamente na governança do clima e da biodiversidade. A distribuição de fundos internacionais de REDD + sem a devida consideração das questões de equidade distributiva mantidas por potenciais países destinatários pode resultar em resultados politicamente inaceitáveis que podem questionar a justiça das instituições globais de uma perspectiva de justiça ambiental. Esse poderia ser o caso se nenhuma medida fosse adotada antes que grandes países que podem fazer frente aos importantes custos de preparação comecem a receber fundos de REDD + de doadores internacionais. Alguns grandes países de REDD +, como o Brasil, já estão bem avançados em seu progresso para começar a recebê-los.

A consideração transparente da equidade na distribuição de fundos de conservação, bem como a avaliação dos resultados em termos de eficiência de carbono e conservação da biodiversidade, é cada vez mais necessária na prática de conservação. As “soluções de fronteira” nas quais os trade-offs são minimizados também estão presentes em nosso estudo em níveis relativamente baixos de patrimônio líquido. No entanto, também é importante notar que, embora as ineficiências de carbono no curto prazo possam aumentar à medida que aumenta a equidade distributiva, o modelo não é capaz de prever efeitos de segunda ordem ao considerar a equidade a longo prazo, dado que a eficiência e a equidade são provavelmente interdependentes em médio e longo prazo por meio de processos políticos.

Nosso modelo mostra que a incorporação explícita da equidade distributiva na forma como os fundos de REDD + são alocados pode levar a um maior número de países destinatários, portanto, se adequadamente implementada, contribui em muitos países pobres para cobrir a lacuna de implementação de prontidão. Para a conservação da biodiversidade baseada em espécies, estudos anteriores descobriram que a distribuição de fundos para um número maior de espécies pode fornecer melhores resultados. No entanto, a preparação prévia por alguns países antes de receber qualquer pagamento com base em resultados é um elemento chave para alcançar resultados equitativos no REDD +. O sucesso na implementação de REDD + requer um certo ambiente institucional dentro dos países e os desafios da pobreza podem minar os resultados de REDD +. Portanto, é necessário abordar as causas subjacentes do desmatamento, que geralmente estão relacionadas à pobreza e ao fraco contexto institucional e governança. Incorporar a equidade nas negociações de fundos de REDD + também pode implicar em trazer países com instituições potencialmente

menos desenvolvidas e maiores desigualdades dentro deles para a arena de REDD +. Aqui, é fundamental respeitar as salvaguardas de REDD +, como os Direitos dos Povos Indígenas. Há uma capacidade de absorção de fundos dos países para usar os fundos de REDD +, que nosso modelo não considera. Nesse sentido, experiências anteriores revelaram que os países precisavam do dobro do tempo estimado para absorver os fundos, dadas as diferentes capacidades de absorção.

Várias suposições afetam os resultados do modelo e indicam a necessidade de pesquisas adicionais. Primeiro, usamos os dados da Avaliação Florestal Global da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) para cobertura florestal e áreas protegidas florestais, embora neste banco de dados cada país forneça dados com base em uma definição diferente de floresta e os valores ausentes sejam preenchidos por extrapolação. Assumimos os custos de oportunidade econômica da conservação da floresta em nível de país, sem considerar as variações espaciais dentro dos países. No entanto, isso não deve afetar significativamente os trade-offs em escala global, considerando o grande número de países incluídos no estudo. Infelizmente, sem dados espacialmente explícitos sobre os custos de oportunidade, não fomos capazes de indicar a localização exata da proteção florestal em cada país. Estudos adicionais usando custos de oportunidade espacialmente explícitos provavelmente alocariam fundos para um número maior de países, já que algumas partes dos países teriam custos de oportunidade mais baixos do que a média que usamos para cada país. Por último, novas pesquisas também devem se concentrar em avaliar até que ponto abordagens mais equitativas, apesar de resultar em ineficiências de carbono e biodiversidade no curto prazo, poderiam, a médio e longo prazo, catalisar processos de REDD + mais eficazes, legítimos e sustentáveis dentro de um número maior dos países e, portanto, ter mais sucesso no cumprimento dos ODS.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Identificar a melhor alocação possível de fundos considerando o sequestro de carbono, a conservação da biodiversidade e a equidade requer um planejamento ideal de acordo com um modelo preciso que inclui a dinâmica das áreas (terras disponíveis para desmatamento e área protegida), custos de implementação de áreas protegidas e critérios (carbono, biodiversidade e equidade) formulações de expressões (funções de terras disponíveis e áreas protegidas). Ter vários critérios exige a geração de fronteiras de Pareto (o conjunto de todas as alocações eficientes de Pareto existentes) dados os diferentes orçamentos de REDD +. Dado este modelo, encontrar um planejamento ótimo é uma tarefa difícil porque o número de todos os planejamentos possíveis é infinito. Para resolver este problema, desenvolvemos um modelo de otimização multiobjetivo, baseado em uma abordagem de programação linear, que fornece soluções ótimas com menos de 1% de erros (mais detalhes no Apêndice SI). Em nosso modelo, os custos de oportunidade por país determinam o custo de implantação de áreas protegidas e equivalem aos recursos recebidos por cada país. Ao contrário de estudos anteriores, não usamos uma heurística de otimização de objetivo único para gerar soluções, mas uma abordagem de otimização exata multiobjetivo, portanto, não precisamos reimplementar as soluções posteriormente como a garantia de que nossa abordagem é ótima (dentro de 1% de erro) é fornecido pela abordagem de modelagem. Os vários conjuntos de dados usados para alimentar o modelo de otimização são descritos nas linhas a seguir.

### **Desmatamento .**

Usamos o conjunto de dados mais recente da Avaliação Global de Recursos Florestais da FAO para obter informações sobre cobertura florestal, biomassa acima do solo e superfície da floresta protegida para os anos de 1990, 2000, 2005, 2010 e 2015 por país. Com esses dados, estimamos a taxa de desmatamento em cada país e a projetamos usando um algoritmo de suavização exponencial para obter as taxas de desmatamento para o período de 2016 a 2030. Para estimar as emissões de carbono, usamos a densidade de carbono da biomassa acima do solo por país da FAO.

### **Biodiversidade .**

Para calcular os principais parâmetros de expressão dos critérios de conservação da biodiversidade, avaliamos o número de espécies em extinção em vários cenários de desmatamento, conforme feito em

estudos anteriores. Usamos os números de espécies endêmicas de pássaros, mamíferos e anfíbios que vivem na floresta em todos os países fornecidos pela União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN).

#### **Custos de oportunidade.**

Os custos de oportunidade foram usados para estimar o custo de reservar uma certa quantidade de terra como área protegida (e, portanto, protegida do desmatamento). Uma vez que não existem estimativas globais robustas de custos de oportunidade espacialmente explícitos, usamos o custo de oportunidade agrícola como uma variável proxy. Para estimar os custos de oportunidade agrícolas médios em cada país de 2001 a 2013, usamos o valor bruto da produção agrícola dos países (em valores em dólares americanos de 2017) e as áreas agrícolas em cada país (em hectares) da FAO. Em seguida, projetamos esses valores para estimar os custos de oportunidade futuros usando um algoritmo de suavização exponencial.

#### **Pobreza.**

Pegamos o número de pessoas que vivem abaixo de 1,90 dólares de paridade de poder de compra por dia em cada país como uma proxy da pobreza, que usamos para atribuir fundos a diferentes países sob a regra de patrimônio máximo – mínimo. Usamos o último valor disponível no Banco de Dados do Banco Mundial desde 2006 para cada país. Em seguida, estimamos a porcentagem da população pobre que vive em cada país selecionado.

#### **Os países elegíveis.**

Os países elegíveis para receber fundos de REDD + foram os países não pertencentes ao Anexo 1 da UNFCCC. Como os dados de pobreza, custos de oportunidade, áreas florestais protegidas, densidade de carbono e biodiversidade não estavam disponíveis para todos os países elegíveis, excluimos outros países da análise, principalmente pequenos países insulares. Um total de 51 países foi incluído no conjunto de dados final. Nenhum dos principais países emissores foi excluído. A descrição do modelo e a operação são descritas no Apêndice SI.