

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

A biodiversidade fortalece os serviços ecossistêmicos e permite o
crescimento econômico sustentável

Ricardo Reale

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:
Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2022

Ricardo Reale
Bacharel em Ciências Biológicas

A biodiversidade fortalece os serviços ecossistêmicos e permite o crescimento econômico sustentável

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:

Profa. Dra. **TERESA CRISTINA MAGRO LINDENKAMP**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Conservação de Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Reale, Ricardo

A biodiversidade fortalece os serviços ecossistêmicos e permite o crescimento econômico sustentável / Ricardo Reale. - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011 - - Piracicaba, 2022.

65 p.

Tese (Doutorado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Biodiversidade 2. Empresas sustentáveis 3. GRACE 4. Desmatamento I. Título

DEDICATÓRIA

Às minhas amadas esposa e filha,
minhas fontes de inspiração e dedicação,
dedico

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Thaysse e minha filha Teresa, por todo amor, carinho, compreensão e muita ajuda ao longo dessa longa jornada. Vocês são minhas fontes de inspiração, dedicação e sanidade!

Aos meus pais, Michele (pai) e Santina (mãe), meu irmão (Giovanni) e minha cunhada (Stefani), por todo amor, carinho, conselhos e apoio essenciais para chegar até aqui, dando forças para me manter focado e alinhado aos objetivos da carreira. Aos meus sogros (Cido e Renata), meus cunhados (Henrique e Felipe), madrinha Mafê por me aturarem em longas explicações no “que afinal das contas eu pesquiso”.

À minha querida orientadora, professora Teresa, pela orientação, segurança, conselhos (pessoais e científicos) e exemplo de professora, pesquisadora, cientista e, sobretudo, ser humano incrível a quem muito admiro. Obrigado por tudo e por tanto!!

À minha supervisora, Imma, por toda a ajuda e conselhos desde nossa primeira troca de e-mails para conversarmos sobre nossa parceria. Por todos os “puxões de orelha”, ensinamentos e dedicação não só ao longo do período de intercâmbio em Oxford, mas também após meu retorno ao Brasil.

Ao meu querido professor Ribas, sempre solícito, atencioso e desafiador, com críticas e sugestões à pesquisa desenvolvida. É sempre uma honra poder contar com seus insentivos e conselhos. Um grande exemplo de professor e cientista, por quem nutro grande estima, respeito e admiração. Muito obrigado por tudo professor!

Ao Departamento de Recursos Florestais (LCF), à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ) e à Universidade de São Paulo (USP) pela oportunidade de realização deste trabalho.

À Universidade de Oxford, por intermédio da Escola de Geografia e Meio Ambiente (SOGE) e do Environmental Change Institute (ECI), pela oportunidade de realizar o intercâmbio, da extensão da estadia para 18 meses e por todo apoio durante a realização do estágio.

Ao Centro de Estudos em Sustentabilidade da Fundação Getúlio Vargas (FGVces) pela oportunidade de participar de incríveis projetos em finanças sustentáveis que tanto colaboram para uma economia mais sustentável no Brasil.

A todos os professores, cientistas e muitos colegas que passaram por essa jornada e que, de alguma forma, contribuíram muito para o resultado final. Em especial, aos colegas do LANP (Laboratório de Áreas Naturais Protegidas) da ESALQ/USP, do DISCO (Disturbance Ecology and Global Change research group) e do Ecosystem Lab. A estadia prolongada em Oxford foi mais fácil graças ao grande apoio e colaboração de todos. Aos amigos em Oxford que fizeram nossos 18 meses tão mais fáceis, leves e divertidos, muito obrigado: Mike, Jenny, Salvatore e Mathias! Vocês tem grande importância neste trabalho! Aos colegas de laboratórios (Ecosystem lab, DISCO e LANP) pelas inúmeras trocas de conhecimento e aprendizados, em especial: Erika, Jesus, David, Guillaume, Yadvinder, Carlota, Tina, Trisha, Manu, Allie, Lisa, Ache, Niki, Eleanor, Walter, Claudia, Cecilia, Huanyuan, Laura, Charlie, Simone, Marcia, Emerson, Beatriz, Gabrielle e Priscila.

Por fim, e com extraordinária importância, a todos os professores e cientistas que me ensinaram tanto por tanto tempo desde o “abcdário” até a conclusão desse trabalho. Inúmeros professores colaboraram DEMAIS pra chegar até aqui.

A todas essas pessoas fantásticas: Muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 (Bolsa), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), sob projetos número 2017/24013-5 (Bolsa no país) e número 2019/15933-9 (Bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior – BEPE). As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade do autor e não necessariamente refletem a visão da FAPESP

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	8
1. INTRODUÇÃO.....	9
Referências	13
2. SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS COMO LASTRO PARA GUIAR O CRESCIMENTO ECONÔMICO SUSTENTADO POR MEIO DE AÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE	15
Resumo	15
Abstract.....	16
2.1 Introdução.....	16
2.2 Material e Métodos.....	19
2.2.1 Seleção de empresas	19
2.2.2 Coleta de dados.....	20
2.2.3 Análise de dados.....	22
2.2.4 Ações para a Conservação da Biodiversidade (ACB).....	22
2.3 Resultados e Discussão.....	26
2.4 Conclusão	32
Agradecimentos.....	32
Referências	33
Apêndice.....	37
3 CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE COMO INDUTOR DO ARMAZENAMENTO TERRESTRE DE ÁGUA NA AMÉRICA DO SUL	39
Resumo	39
Abstract.....	40
3.1 Introdução.....	41
3.2 Metodologia.....	43
3.2.1 Área de estudo	43
3.2.2 Coleta de dados.....	45
3.2.3 Análise de dados.....	46
3.2.4 Análise estatística	47
3.3 Resultados e Discussão.....	48
3.4 Conclusão	57
Referências	58
Apêndice.....	62
4 CONCLUSÃO.....	63
5 CÓDIGOS E SCRIPTS	65

RESUMO

A biodiversidade fortalece os serviços ecossistêmicos e permite o crescimento econômico sustentável

As populações humanas obtêm benefícios dos ecossistemas íntegros, através dos serviços ecossistêmicos. No entanto, o consumo acelerado e insustentável dos recursos naturais gera degradação ambiental, reduz a biodiversidade e compromete as capacidades de resiliência e resistência dos ecossistemas às adversidades climáticas. Todavia, é crescente o número de organizações que se adequam aos preceitos da sustentabilidade, seja por requisitos dos mercados acionários, seja por requisitos das certificações ambientais. Porém, pouco se discute se esse alinhamento à sustentabilidade é suficiente para repor o estoque de serviços ecossistêmicos consumidos. Desta forma, investigamos a hipótese de que o aumento do número de empreendimentos considerados sustentáveis não contribui para a preservação e recuperação dos serviços ecossistêmicos na mesma velocidade em que são consumidos. Para tanto, o projeto foi dividido em duas grandes fases. Durante a primeira fase, analisamos o histórico de desempenho dos sistemas de gestão ambiental de um grupo de empresas com práticas sustentáveis reconhecidas pelo mercado acionário brasileiro. Embora os empreendimentos analisados já venham desenvolvendo atividades visando minimizar os impactos negativos ao meio ambiente, além de desenvolverem diversas Ações para a Conservação da Biodiversidade (ACB), como a criação de 1.360 Km² de áreas naturais protegidas, demonstramos que as práticas realizadas são insuficientes para a reposição dos serviços ecossistêmicos explorados por essas organizações. Concluímos a primeira fase indicando que as ACB deveriam ser inseridas no centro de tomadas de decisões do tripé da sustentabilidade para interromper o “paradoxo de Jevons” de maneira a reestabelecer os serviços ecossistêmicos consumidos e, por tanto, atender aos preceitos originais da sustentabilidade. Sendo assim, é necessário desenvolver ações que estimulem a geração de serviços ecossistêmicos na mesma velocidade de consumo atual e futuro dessas corporações. Desse modo, na segunda fase do projeto, investigamos a dinâmica do Armazenamento Terrestre de Água (do inglês Terrestrial Water Storage – TWS) com a cobertura de vegetação nativa das regiões tropical e subtropical da América do Sul. Demonstramos que quanto maior a taxa de cobertura de vegetação nativa, maior é o TWS, independentemente das tendências de precipitação e temperatura. Ou seja, regiões com maior cobertura de vegetação nativa possuem maior capacidade de reter água e manter a velocidade do ciclo hidrológico do que regiões que perderam a maior parte da cobertura original. Nossos resultados indicaram que a cobertura de vegetação nativa é o principal componente para a previsão das tendências de TWS, independentemente das tendências regionais de precipitação e temperatura. Por fim, foi possível estimar a quantidade de água que as áreas naturais fornecem ao longo de uma década para qualquer bioma tropical e subtropical sul-americano. Estimamos que cada 1 Km² de cobertura de vegetação nativa, nas diferentes regiões, contribui para um TWS entre 0.201×10^{-3} Km³ a 0.307×10^{-3} Km³ ao longo de dez anos. Desse modo, o total de áreas protegidas criadas pelos empreendimentos aqui avaliados (1.360 Km²), contribuem com apenas entre 18% a 27% do total de água consumido por essas empresas ao longo de uma década. Por fim, projetos de governança poderiam propor o desenvolvimento de consórcios conservacionistas para estimular os resultados positivos nos ecossistemas anteriormente ao crescimento econômico, como escudo para evitar danos ambientais e perpetuar os serviços ecossistêmicos tão necessários a toda vida no planeta. Dessa forma, os serviços ecossistêmicos poderiam ser utilizados como novo lastro para crescimento econômico sustentado através das ações para a conservação da biodiversidade.

Palavras-chave: TWS, GRACE, Sustentabilidade, MapBiomas

ABSTRACT

Biodiversity strengthens ecosystem services and enables sustainable economic growth

Human populations obtain benefits from intact ecosystems through ecosystem services. However, accelerated and unsustainable natural resource consumption generates environmental degradation, reduces biodiversity and compromises the resistance and resilience of ecosystems to climatic adversities. Nonetheless, the number of organizations adopting sustainable precepts is growing due to the requirements of the stock markets or environmental certifications. However, the discussions about whether sustainability alignments are sufficient to replenish the ecosystem services consumed by companies are still incipient. In this way, we hypothesized that increasing the number of sustainable companies does not contribute to the ecosystem services recovery at the same speed at which they are consumed. To this end, we divided the project into two major phases. During the first phase, we analyzed the environmental management systems performance of a group of companies with sustainable practices recognized by the Brazilian stock market. Although these companies are mitigating their negative environmental impacts and are developing several Biodiversity Conservation Actions (BCA), such as creating 1,360 km² of protected natural areas, we demonstrated that the practices carried out are insufficient to replace the ecosystem services exploited by these organizations. We concluded the first phase by indicating that BCA should be inserted at the centre of sustainability tripod decision-making to interrupt the “Jevons paradox” to restore the ecosystem services consumed and meet the original precepts of sustainability. Therefore, it is necessary to develop actions that stimulate the generation of ecosystem services at the same speed as these corporations’ current and future consumption. Thus, in the second phase, we investigated the dynamics of Terrestrial Water Storage (TWS) with the native vegetation cover from tropical and subtropical regions of South America. We demonstrated that the higher the native vegetation cover rate, the higher the TWS, independently of precipitation and temperature trends. Regions covered by a large extension of native vegetation have a greater capacity to retain water and maintain the speed of the hydrological cycle than regions which lost most of their original coverage. Our results indicated that native vegetation cover is the main component for predicting TWS trends, regardless of regional precipitation and temperature trends. Finally, it was possible to estimate the amount of water that natural areas provide over a decade for any South American tropical and subtropical biome. We estimated that every 1 Km² of native vegetation cover contributes between 0.201x10⁻³ Km³ to 0.307x10⁻³ Km³ of TWS over ten years. Thus, the total number of protected areas created by the five companies evaluated here (1,360 Km²) contribute only between 18% and 27% of the total water consumed by these companies over a decade. Then, governance projects could propose the development of conservation consortia to stimulate positive results in ecosystems prior to economic growth as a shield to avoid environmental damage and perpetuate ecosystem services necessary for all life on the planet. In this way, ecosystem services could be used as a new ballast for sustained economic growth through actions for the conservation of biodiversity.

Keywords: TWS, GRACE, Sustainability, MapBiomass

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACB	Ações para a Conservação da Biodiversidade
ACB _{min}	Ações para a Conservação da Biodiversidade mínimo
ACB _{realizado}	Ações para a Conservação da Biodiversidade realizado
APP	Área de Preservação Permanente
B3	Brasil, Bolsa, Balcão
BF	Fator de Bayes (<i>Bayes fator</i>)
COP	Conferência das Partes
GEE	Gases de Efeito Estufa
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GRI	<i>Global Reporting Initiative</i>
IA	Inteligência Artificial
IIB	Índice de Impacto à Biodiversidade
ISE	Índice de Sustentabilidade Empresarial
LIFE	<i>Lasting Initiative for Earth</i> – Português: Iniciativa Duradoura pela Terra
LLJ	<i>Low Level Jets</i> – Português: Jatos de Baixo Nível
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RL	Reserva Legal
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SIG	Sistema de Informação Geográfica
TEEB	<i>The Economics of Ecosystems and Biodiversity</i>
TWS	<i>Terrestrial Water Storage</i> – em Português: Armazenamento Terrestre de Água
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão das fronteiras urbana, agrícola, elétrica e industrial sobre as áreas naturais, ocorre aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera terrestre. Segundo o (IPCC, 2022), cerca de 58% das emissões líquidas acumuladas de CO₂ do período de 1850 a 2019 ocorreram entre 1850 a 1989, e cerca de 42% no período de 1990 a 2019. Esse aumento das emissões de gases somado ao desmatamento e às pressões negativas sobre a biodiversidade, modificaram os ciclos biogeoquímicos do planeta, minimizando a resiliência e resistência dos ecossistemas às alterações climáticas (CHAPIN III et al., 2000; HAUTIER et al., 2015; ISBELL et al., 2015). Portanto, o aumento das produções industrial, agrícola e energética potencializa a crise da biodiversidade, afetando diretamente os ecossistemas, diminuindo a produtividade ecossistêmica e piorando a qualidade da vida no planeta.

Os sistemas ecológicos são importantes para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, fornecendo benefícios diretos, como água, energia e alimentos; benefícios regulatórios, como purificação da água, controle de enchentes e de erosão; ou benefícios indiretos, como ciclo de nutrientes, produção de solo e fotossíntese (ZOLIN et al., 2014). Por tanto, estimular a regeneração, a resiliência e a resistência ecossistêmica colaboram para evitar um colapso econômico devido à escassez de recursos naturais, uma vez que a economia global é diretamente dependente dos recursos naturais e dos serviços ecossistêmicos.

Sukhdev et al. (2010), no estudo realizado a pedido do PNUMA (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente) que resultou no TEEB (*The Economics of Ecosystems and Biodiversity*), estimaram que 40% da economia mundial baseia-se em produtos oriundos da biodiversidade ou de seus processos ecológicos. No entanto, ainda são poucos os empreendimentos que desenvolvem ações para a conservação, preservação e manutenção da composição, estrutura e função dos sistemas ecológicos. Addison et al. (2019) demonstram que apenas cinco por cento das grandes corporações do mundo possuem compromissos de biodiversidade específicos, mensuráveis e com tempo de execução objetivo, apesar de metade das corporações indicarem em seus relatórios que reconhecem a biodiversidade como importante para os negócios.

Neste contexto, o Acordo de Paris assinado no final da 21ª Conferência das Partes (COP 21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) em dezembro de 2015, deixou claro que o setor empresarial terá papel de destaque para contribuir na redução do consumo de recursos naturais e no desenvolvimento de ações que visem interromper ou frear o aquecimento global (UNFCCC. CONFERENCE OF THE PARTIES (COP), 2015). Além disso, os países signatários comprometeram-se em limitar o aumento da temperatura do planeta em no máximo 2°C em relação aos registros de 1850, esforçando-se para que não ultrapasse o 1,5°C (BRASIL, 2016). Dessa forma, ao ratificarem o acordo internamente em territórios nacionais, ocorrerá maior e melhor pressão para que os diversos setores econômicos contribuam para atingir as metas ambientais e climáticas estabelecidas.

Ademais, além dos diversos encontros de representantes mundiais sobre as questões ambientais planetárias e das diferentes certificações ambientais existentes, as bolsas de valores das principais economias

do planeta desenvolveram os índices de sustentabilidade empresarial (MARCONDES; BACARJI, 2010). Essas carteiras são compostas por empresas de capital aberto que possuam, de acordo com os critérios das diferentes bolsas, processos produtivos com algum grau de sustentabilidade, de acordo com os critérios elencados por cada bolsa de valor. As principais bolsas de valores do planeta que possuem índices de sustentabilidade são: EUA, Japão, Reino Unido, China, Austrália, Brasil e África do Sul. Não obstante, estes países representam algumas das economias mais importantes do mundo, assim como também são os maiores emissores de GEE (IPCC, 2022).

Através das carteiras de sustentabilidade, as bolsas de valores do mundo tentam estimular a prática do desenvolvimento sustentável nas organizações, através da comercialização, em grande escala, do reconhecimento econômico da sustentabilidade no setor empresarial. Rossi (2009) demonstrou que na bolsa de valores de São Paulo – B3 (Brasil, Bolsa, Balcão) – entre 2005 e 2008, as empresas participantes do índice de sustentabilidade empresarial (ISE) tiveram valoração de mercado entre 10% e 19% superior às do grupo que não participou da carteira sustentável da B3 no mesmo período. Assim, com o tempo, aumentou-se o interesse de investidores comprarem ações de empresas que possuíssem algum reconhecimento de sustentabilidade. Além disso, o corpo executivo dessas empresas também começou a ter mudanças de posturas e o interesse em entrar ou permanecer em carteiras de sustentabilidade aumentou.

Sendo assim, e devido às pressões do mercado, sociedade, acionistas e stakeholders, as empresas começaram a se adequar aos preceitos da sustentabilidade, desde aprimoramentos no modelo de produção, diminuindo o consumo de recursos naturais e a geração de resíduos e gases, como também melhoraram o relacionamento externo com populações limítrofes do empreendimento. Embora muitos dos avanços tenham ocorrido devido ao cumprimento e requisitos de legislação ou certificações socioambientais, importantes avanços ocorreram e uma mudança de postura estabeleceu-se. Apesar de ainda tímidos resultados, já existem empresas na vanguarda do desenvolvimento sustentável e que iniciaram processos de adequação focando esforços para a conservação da biodiversidade como forma de minimizar e mitigar suas próprias externalidades (Reale, 2016; Reale et al., 2018, 2016).

No entanto, como evidenciado por Reale et al. (2022, 2019, 2018, 2016), apesar do aumento por parte do setor empresarial no desenvolvimento de ações de cunho sustentável, poucas ações de fato são realizadas e que contribuem, em algum grau, para recuperação dos serviços ecossistêmicos. Os autores ainda indicam que os empreendimentos estão mais preocupados em atenderem aos requisitos da legislação ambiental brasileira ou às conformidades de diferentes certificações ambientais do que realmente preocupados em como desenvolver corretas ações pró-serviços ecossistêmicos. Empresas que possuem maior ligação ou dependência direta com os serviços ecossistêmicos, possuem melhores resultados em ações conservacionistas. Ou seja, faltam ferramentas práticas que orientem os diferentes gestores a decidirem, baseados em seus processos produtivos e em suas atribuições de corpo diretivo, o que necessitam realizar para tornarem seus empreendimentos mais sustentáveis e consumirem menos recursos naturais, ou consumirem recursos naturais que foram previamente estabelecidos através de ações para a conservação da biodiversidade desenvolvidas pelas próprias empresas.

Sendo assim, este projeto visou testar a seguinte hipótese: O aumento no número de empreendimentos reconhecidos como sustentáveis não contribui para a preservação e conservação dos ecossistemas na mesma taxa e/ou velocidade em que consomem os serviços ecossistêmicos. Ou seja, os resultados das ações conservacionistas realizadas pelas empresas são lentos quando comparados à rápida taxa de utilização dos recursos naturais. Portanto, o objetivo geral do projeto foi analisar e investigar a relação entre sustentabilidade e conservação da biodiversidade no setor empresarial frequentemente listado em carteiras de sustentabilidade. Dessa forma, o projeto foi dividido em duas grandes fases: 1) “Operacionalização da Conservação da Biodiversidade”, subdividida em quatro etapas; 2) “Operacionalização da Sustentabilidade”, avaliada pela junção das etapas da fase anterior. A Figura 1 apresenta a esquematização das operacionalizações e suas respectivas etapas.

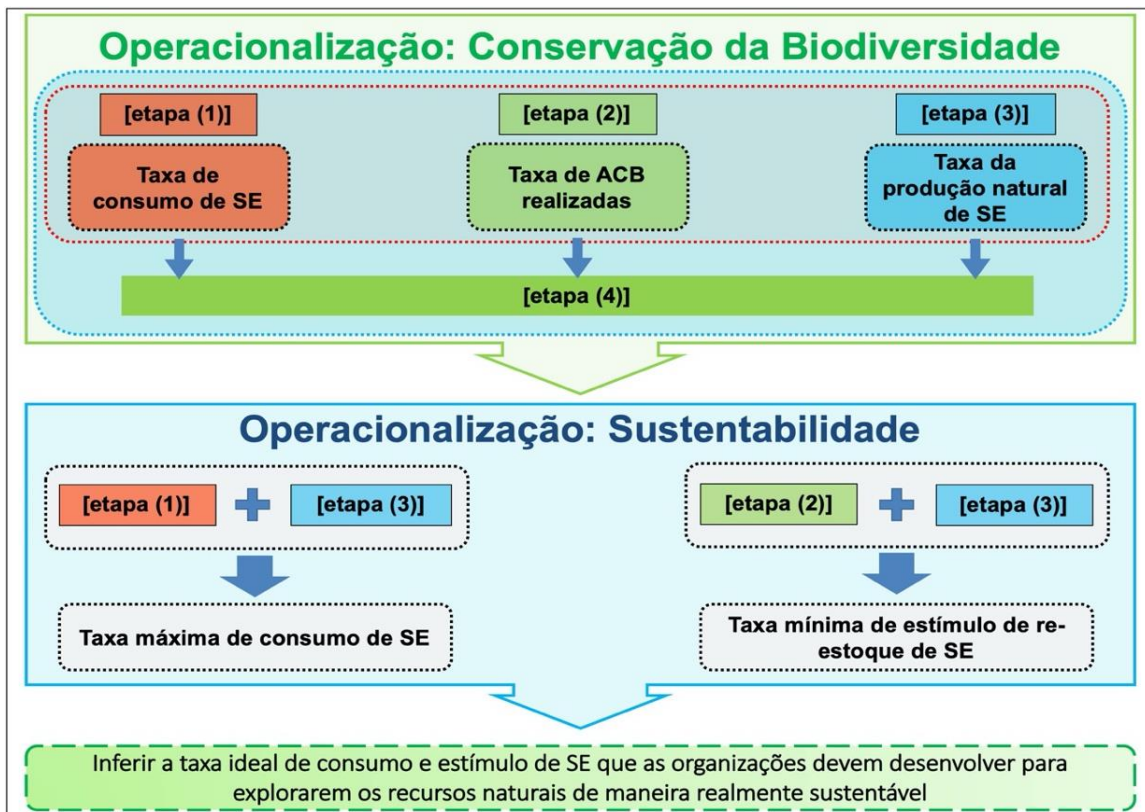


Figura 1. As quatro principais etapas do projeto de pesquisa: [etapa (1)] e [etapa (2)] foram desenvolvidas no Brasil. Além disso, a [etapa (3)] foi desenvolvida na Inglaterra durante doutorado sanduíche de 18 meses, e a [etapa (4)] é a junção das anteriores para conclusão da Tese.

*ACB: Ações para a Conservação da Biodiversidade

A primeira fase, “Operacionalização da Conservação da Biodiversidade”, foi dividida em quatro etapas: [etapa (1)], para calcular a taxa de consumo de serviços ecossistêmicos das empresas avaliadas; [etapa (2)], para calcular a taxa de ações para a conservação da biodiversidade realizadas pelas empresas avaliadas no projeto; [etapa (3)], para calcular a taxa de produção natural de serviços ecossistêmicos das áreas naturais;

[etapa (4)], junção lógica das etapas anteriores para discussão da “Operacionalização de Sustentabilidade”. Ou seja, a junção dos resultados da [etapa (1)] com [etapa (3)] forneceu qual seria a taxa máxima de consumo de serviços ecossistêmicos; enquanto que os resultados da [etapa (2)] com [etapa (3)] forneceu a taxa mínima de estímulo em Ações para a Conservação da Biodiversidade (ACB) necessária para que ocorra o mínimo de estímulo para reestabelecimento dos serviços ecossistêmicos. Por fim, foi possível inferir qual a taxa ideal de consumo e estímulo dos Serviços Ecossistêmicos que as organizações deveriam desenvolver para tornar-se sustentável quanto ao consumo de recursos hídricos necessários à sua atividade econômica.¹

Assim, para que ocorram reduções significativas da temperatura global, da crise da biodiversidade e da crise hídrica, será necessário que os empreendimentos, em conjunto com governos e sociedade, desenvolvam ações para, além de recuperar as áreas degradadas, aumentem o tamanho e a qualidade ambiental das áreas naturais, realizando reflorestamento de vegetação nativa e desenvolvendo outras ações de enriquecimento para a conservação da biodiversidade.

Por tanto, foram avaliados como os setores econômicos poderiam tornar mais sustentáveis suas atividades, inserindo os serviços ecossistêmicos como lastro para validar o crescimento econômico sustentado, através do desenvolvimento de ACB. Esse caráter teórico da primeira fase foi testado e investigado na segunda fase do projeto, focando esforços na quantificação do armazenamento terrestre de água. Considerando que a água, em todas as suas formas, é fundamental para a vida no planeta, e que sua conservação, preservação e manutenção estão fortemente correlacionados com a composição, estrutura e função dos sistemas ecológicos tropicais e subtropicais, avaliou-se o efeito protetor da vegetação nativa nos diferentes biomas da América do Sul para o armazenamento terrestre de água. Por fim, dada a importância da água para a biosfera, sua preservação através de soluções baseadas na natureza possibilita a preservação e perpetuação dos demais serviços ecossistêmicos.

Assim, indicou-se a possibilidade do desenvolvimento de uma ferramenta prática e de uso simplificado para que tomadores de decisão possam pautar o crescimento econômico de suas organizações nas ACB, preferencialmente na expansão e conservação de áreas naturais. Dessa forma, baseado no crescimento econômico histórico e pautados no consumo de recursos naturais (água) utilizados no período para atingir aquele crescimento econômico, será possível que as corporações indiquem ações conservacionistas focadas no volume de serviços ecossistêmicos necessários para atingir o crescimento econômico futuro e, dessa forma, retirem da natureza aquilo que foi previamente recarregado. Ou seja, um consumo realmente sustentável.

¹ O presente trabalho foi escrito no formato de dois artigos científicos que abrangem as etapas mencionadas. As [etapa (1)] e [etapa (2)] referem-se ao capítulo 02, artigo científico já publicado no *Journal of Cleaner Production*, conforme indicado. Já as [etapa (3)] e [etapa (4)] referem-se ao capítulo 03, que encontra-se em revisão no periódico *Nature Communications*.

Referências

- ADDISON, P. F. E.; BULL, J. W.; MILNER-GULLAND, E. J. Using conservation science to advance corporate biodiversity accountability. **Conservation Biology**, v. 33, n. 2, p. 307–318, 5 abr. 2019.
- BRASIL. Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. 2016.
- CHAPIN III, F. S.; ZAVALA, E. S.; EVINER, V. T.; NAYLOR, R. L.; VITOUSEK, P. M.; REYNOLDS, H. L.; HOOPER, D. U.; LAVOREL, S.; SALA, O. E.; HOBBIE, S. E.; MACK, M. C.; DÍAZ, S. Consequences of changing biodiversity. **Nature**, v. 405, n. 6783, p. 234–242, 11 maio 2000.
- HAUTIER, Y.; TILMAN, D.; ISBELL, F.; SEABLOOM, E. W.; BORER, E. T.; REICH, P. B. Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity. **Science**, v. 348, n. 6232, p. 336–340, 17 abr. 2015.
- IPCC, 2022. **Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001.
- ISBELL, F.; CRAVEN, D.; CONNOLLY, J.; LOREAU, M.; SCHMID, B.; BEIERKUHNLIN, C.; BEZEMER, T. M.; BONIN, C.; BRUELHEIDE, H.; DE LUCA, E.; EBELING, A.; GRIFFIN, J. N.; GUO, Q.; HAUTIER, Y.; HECTOR, A.; JENTSCH, A.; KREYLING, J.; LANTA, V.; MANNING, P.; MEYER, S. T.; MORI, A. S.; NAEEM, S.; NIKLAUS, P. A.; POLLEY, H. W.; REICH, P. B.; ROSCHER, C.; SEABLOOM, E. W.; SMITH, M. D.; THAKUR, M. P.; TILMAN, D.; TRACY, B. F.; VAN DER PUTTEN, W. H.; VAN RUIJVEN, J.; WEIGELT, A.; WEISSER, W. W.; WILSEY, B.; EISENHAEUER, N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. **Nature**, v. 526, n. 7574, p. 574–577, 14 out. 2015.
- MARCONDES, A. W.; BACARJI, C. D. **ISE: Sustentabilidade no mercado de capitais**. 1. ed. São Paulo: Report Editora, 2010. 173 p.
- REALE, R. Conservação da biodiversidade por empresas de capital aberto: uma análise através da metodologia LIFE. p. 94, 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11150/tde-03102016-174101/pt-br.php>>. Acesso em: 6 mar. 2017.
- REALE, R.; MAGRO, T. C.; RIBAS, L. C. Measurement and analyses of biodiversity conservation actions of corporations listed in the Brazilian stock exchange's corporate sustainability index. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 14–24, jan. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617321212>>.
- REALE, R.; MAGRO, T. C.; RIBAS, L. C. Biodiversity conservation actions as a tool to improve the management of sustainable corporations and their needs ecosystem services. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 1–10, maio 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619304184>>.
- REALE, R.; RIBAS, L. C.; BORSATO, R.; MAGRO, T. C.; VOIGTLAENDER, M. The LIFE certification methodology as a diagnostic tool of the environmental management system of the automotive industry. **Environmental Science & Policy**, v. 57, p. 101–111, mar. 2016.

- REALE, R.; RIBAS, L. C.; MAGRO LINDENKAMP, T. C. Ecosystem services as a ballast to guide sustained economic growth by biodiversity conservation actions. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, p. 131846, 15 jul. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622014561>>. Acesso em: 9 maio. 2022.
- ROSSI, J. L. What is the Value of Corporate Social Responsibility? An Answer from the Brazilian Sustainability Index. **SSRN Electronic Journal**, n. 150, p. 1–18, 2009.
- SUKHDEV, P.; WITTMER, H.; SCHRÖTER-SCHLAACK, C.; NESSHÖVER, C.; BISHOP, J.; TEN BRINK, P.; GUNDIMEDA, H.; KUMAR, P.; SIMMONS, B. **The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB**. Malta: TEEB, 2010. 39 p.
- UNFCCC. CONFERENCE OF THE PARTIES (COP). Adoption of the Paris Agreement. Proposal by the President. Em: Paris Climate Change Conference - November 2015, COP 21, 2015, Paris. [...]. Paris: 2015. p. 32.
- ZOLIN, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; MINGOTI, R.; PAULINO, J.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; GONZÁLEZ, A. M. O. The first Brazilian municipal initiative of payments for environmental services and its potential for soil conservation. **Agricultural Water Management**, v. 137, p. 75–83, maio 2014.

2. SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS COMO LASTRO PARA GUIAR O CRESCIMENTO ECONÔMICO SUSTENTADO POR MEIO DE AÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Este capítulo, resultado direto e original desta Tese de Doutorado, foi primeiramente publicado em inglês no periódico internacional *Journal of Cleaner Production* de 15/07/2022. Aqui, é apresentada a versão traduzida para o português, completa e sem alterações.

O artigo em inglês publicado no *Journal of Cleaner Production* está disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131846>.

Também está disponível no repositório SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4106710>

© <2022>. This manuscript version is made available under the CC-BY-NC-ND 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Resumo

A perda de biodiversidade reduz a produtividade dos ecossistemas gerando impactos negativos na economia global. Embora a economia seja dependente da biodiversidade ou de seus processos ecológicos, poucas empresas desenvolvem Ações para a Conservação da Biodiversidade (ACB) para beneficiar os ecossistemas, apesar do crescente número de empresas sustentáveis em todo o mundo. Aqui, investigamos a relação entre sustentabilidade e conservação da biodiversidade de cinco corporações sustentáveis que controlam mais de 1.130.000 hectares em cinco biomas brasileiros. Abordamos a hipótese de que empresas sustentáveis desenvolvem ACB para mitigar seus impactos ambientais negativos e estimular a reposição de serviços ecossistêmicos que usaram. Para tanto, foram analisadas 5.420 páginas de relatórios anuais de sustentabilidade divulgados entre os anos de 2011 a 2018, qualificando e quantificando o ACB indicado pelos relatórios anuais das empresas. Descobrimos que 90% das unidades não mitigaram nenhum impacto ambiental negativo. Não encontramos nenhum ACB que contemplasse todas as unidades produtivas de cada empresa, constatando que a maioria das ações de conservação se concentrava em poucas áreas, a maioria exigida pela legislação ambiental local. As empresas estão mais preocupadas em como economizar custos de Sistemas de Gestão Ambiental do que reconstruir os ecossistemas. Mostramos a possibilidade de interromper o “Paradoxo de Jevons” ao colocar o ACB no centro do pensamento do tripé da sustentabilidade. Finalmente, uma vez que o ACB beneficie os serviços ecossistêmicos, eles devem ser usados como lastro para validar o crescimento econômico sustentado que respeite as gerações atuais e futuras.

Palavras-chaves: Serviços ecossistêmicos; Sustentabilidade; Conservação da biodiversidade; Metodologia da certificação LIFE; Impactos ambientais;

Ecosystem services as a ballast to guide sustained economic growth by biodiversity conservation actions

Authors: Ricardo Reale ^{a, b, d}; Luiz César Ribas ^c; Teresa Cristina Magro Lindenkamp ^a

a – Department of Forest Sciences, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, São Paulo, Brazil;

b – Environmental Change Institute, School of Geography and the Environment, University of Oxford, Oxford, UK

c – Department of Rural Engineering and Socioeconomy, School of Agriculture, Sao Paulo State University. Fazenda Lageado, Botucatu, São Paulo, Brazil

d – **Corresponding author:** realericardo@gmail.com

© <2022>. This manuscript version is made available under the CC-BY-NC-ND 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Abstract

Biodiversity loss reduces ecosystems productivity generating negative impacts on the global economy. Even though the economy is dependent on biodiversity or its ecological processes, few companies develop Biodiversity Conservation Actions (ACB) to benefit ecosystems, despite the growing number of sustainable companies worldwide. Here, we investigated the relationship between sustainability and biodiversity conservation of five sustainable corporations which controls more than 1,130,000 hectares in five Brazilian biomes. We hypothesized that sustainable companies develop ACB to mitigate their negative environmental impacts and stimulate the refill of ecosystem services they had used. We analyzed 5,420 pages of annual sustainable reports between 2011 to 2018, qualifying and quantifying ACB indicated by each year companies' reports. We discovered that 90% of the units did not mitigate any negative environmental impacts. We found no ACB that included all productive units of each company, finding that most of the conservation actions were concentrated in few areas, most of them required by law. Companies are most concerned with how to economize costs of Environmental Management Systems than rebuild the ecosystems. We show a possibility to interrupt the "Jevons Paradox" by implementing ACB into the center of the sustainability tripod's thinking. Finally, once ACB benefits the ecosystem services, they should be used as a ballast to validate sustained economic growth that respects the current and future generations.

Keywords: Ecosystem services; Sustainability; Biodiversity conservation; LIFE certification; Environmental impacts;

2.1 Introdução

Após a Primeira Revolução Industrial no século XVIII (1750), a demanda da população mundial por bens e serviços cresceu vertiginosamente, principalmente após o término da Segunda Guerra Mundial (MARTINE; ALVES, 2015). O consumismo provocou aumento na exploração comercial e industrial dos recursos naturais de forma insustentável, impedindo que os ecossistemas se regenerassem adequadamente, ocasionando severos danos ambientais e climáticos (MARTINE; ALVES, 2015). Assim, os modelos de

exploração, consumo e produção devem ser redesenhados e alinhados aos princípios da sustentabilidade. Para tanto, devem concentrar esforços na preservação, conservação e restauração ambiental, respeitando e incentivando a resiliência dos ecossistemas por meio da gestão da biodiversidade para perpetuar os serviços ecossistêmicos.

Vários estudos mostram que a perda de biodiversidade reduz fortemente o funcionamento dos ecossistemas (CARDINALE *et al.*, 2012; CHAPIN III *et al.*, 2000; HAUTIER *et al.*, 2018; HOOPER *et al.*, 2005; TILMAN; REICH; ISBELL, 2012). Além disso, o aumento das emissões de gases de efeito estufa (GEE), o desmatamento e a defaunação contribuem para modificar os ciclos biogeoquímicos do planeta, minimizando a resiliência e resistência dos ecossistemas às mudanças climáticas (MALHI *et al.*, 2016; NORRIS *et al.*, 2020; OLIVER *et al.*, 2015). Uma vez que a população mundial é dependente de serviços ecossistêmicos e altamente vulnerável a extremos climáticos (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT, 2005), compreender o papel da biodiversidade na manutenção dos sistemas ecológicos e sua relação com o clima do planeta são objetivos essenciais (PIMM *et al.*, 2014). Além disso, é crucial conectar a biodiversidade com a sustentabilidade e o crescimento econômico. Os principais atores econômicos estão cada vez mais conscientes e já utilizam modelos climáticos para avaliar seus riscos financeiros e modelos econômicos (FIEDLER *et al.*, 2021). Eles também participam ativamente de reuniões, grupos e acordos globais para promover um modelo econômico que respeite os sistemas naturais (ORSATO *et al.*, 2015).

Isso significa que, como a economia global é fortemente dependente dos serviços ecossistêmicos (COSTANZA *et al.*, 1997, 2007, 2014; HERNÁNDEZ-BLANCO *et al.*, 2020), a perda de biodiversidade (HAUTIER *et al.*, 2015; ISBELL *et al.*, 2011, 2015; TILMAN; ISBELL; COWLES, 2014) representa a degradação do sistema econômico. Assim, estimular o reabastecimento dos serviços ecossistêmicos pela conservação da biodiversidade é fundamental para a manutenção da economia global. No entanto, questões de Ações para a Conservação da Biodiversidade (ACB) ainda possuem baixa ou nenhuma adesão por parte das maiores empresas do mundo (ADDISON; BULL; MILNER-GULLAND, 2019), sendo que as poucas ações existentes são geralmente executadas para mitigar externalidades relacionadas ao Sistema de Gestão Ambiental (SGA) do empreendimento do que relacionadas às melhorias nos sistemas ecológicos (REALE *et al.*, 2016; REALE; MAGRO; RIBAS, 2018, 2019). Essa percepção pode ser observada na crescente lista de bolsas de valores e fundos de investimentos que possuem portfólios específicos de empresas que foram reconhecidas pelos mercados de valores como compromissadas com a sustentabilidade (ORSATO *et al.*, 2015), sem desenvolver ACB ou preservação de ecossistemas.

Independentemente de parte do setor empresarial concordar com a importância da biodiversidade e as mudanças climáticas, os esforços para conservar a diversidade biológica falham em todo o mundo (ARLIDGE *et al.*, 2018). Por exemplo, Addison *et al.* (2019) analisaram as 100 maiores empresas globais e concluíram que apenas cinco delas possuem compromissos de biodiversidade específicos, mensuráveis e com tempo de execução objetivo, embora 49% (49 empresas) mencionem a importância da biodiversidade em seus relatórios. Nos relatórios de sustentabilidade fica evidente que as metas de sustentabilidade estão

focadas em minimizar os usos dos aspectos ambientais. No entanto, não há menção à manutenção dos recursos naturais e ao estímulo necessário dos ecossistemas para a produção de mais serviços ecossistêmicos.

Reale et al. (2019, 2018) destacam que das 14 empresas avaliadas que estão listadas no ISE (Índice de Sustentabilidade Empresarial) da bolsa de valores do Brasil, participaram de todos os índices de 2005 a 2014, apenas uma empresa (setor florestal) havia mitigado seus impactos ambientais negativos via ACB. As demais empresas avaliadas na mesma perspectiva, dependentes direta e indiretamente de serviços ecossistêmicos, não desenvolveram ações suficientes para mitigar seus impactos ambientais. A análise considerou os relatórios de sustentabilidade divulgados por cada empresa para demonstrar seus resultados econômicos, sociais e ambientais, além de indicar seus objetivos futuros e transparência (SIEW, 2015).

O relatório de Brundtland “Nosso futuro comum”, de 1987, definiu o desenvolvimento sustentável como “(...) a capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades” (WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT, 1987). Essa definição colaborou para criar e disseminar os conceitos de sustentabilidade para quase todos os níveis da sociedade. No entanto, os principais atores políticos, econômicos e até ambientais continuam utilizando os conceitos exclusivamente para minimizar o consumo de recursos e mitigar impactos negativos ao invés de priorizar a reposição dos estoques naturais utilizados. Mais de três décadas após a publicação do relatório Brundtland e o consumismo ter aumentado exponencialmente, a interpretação como está não gera a contribuição necessária para que as gerações futuras tenham suas necessidades ambientais garantidas. As necessidades atuais são muito maiores do que o previsto quando o desenvolvimento sustentável foi definido no final do século XX. Além disso, é impossível prever com precisão mínima qual será a necessidade de consumo de recursos naturais pelas gerações futuras. Mesmo que se estabeleçam metas ambiciosas para minimizar o consumo e mitigar os danos, a imprevisibilidade dos novos avanços tecnológicos e o conseqüente aumento do consumo de matéria-prima cria obstáculos para que metas de qualquer prazo sejam estabelecidas sob o aspecto exclusivo das mitigações.

William Stanley Jevons em 1866 observou que o aumento da eficiência do uso do carvão acelerou seu consumo ao invés de diminuí-lo, pois o progresso, direta e indiretamente, estimulou novas atividades que precisavam consumir mais matéria-prima e, paradoxalmente, o avanço tecnológico resulta, então, no aumento do consumo de recursos naturais (JEVONS, 1866). Mesmo minimizando os impactos ambientais negativos e utilizando os recursos naturais de forma mais eficiente, o consumo de matérias-primas aumentará, conforme indicado pelo “Paradoxo de Jevons”, gerando degradação dos ecossistemas. Para quebrar esse processo, nossas conclusões indicam que o crescimento econômico deve pautar-se pela reconstrução da funcionalidade do ecossistema, onde a velocidade de consumo dos recursos naturais deve respeitar a resiliência do ecossistema.

No entanto, apoiados em nossos resultados, mesmo empresas reconhecidas como detentoras das melhores práticas sustentáveis, que desenvolvem atividades importantes, visando uma economia que exerça menor pressão sobre os ecossistemas, não desenvolvem ações para repor os serviços ecossistêmicos. Isso significa que a conservação da biodiversidade ainda não foi inserida como o cerne da definição de desenvolvimento sustentável. Assim, é necessário que, além de reduzir o consumo de aspectos ambientais,

as empresas desenvolvam práticas de recuperação e reposição de serviços ecossistêmicos dos quais suas atividades econômicas são dependentes. É fundamental alertar que o ACB e o estímulo para aumentar a resiliência das funções ecossistêmicas são entendidos como as ações planejadas que respeitam toda a estrutura ecológica da região onde as ações serão realizadas (SMITH *et al.*, 2018).

Sendo assim, aqui investigamos qual a relação entre sustentabilidade e conservação da biodiversidade de cinco grandes corporações no Brasil que possuem reconhecimento do mercado acionário como empresas detentoras das melhores práticas em sustentabilidade em seus respectivos setores de atuação. Os empreendimentos possuem dependência direta dos serviços ecossistêmicos de provisão (água) para desenvolvimento de suas atividades econômicas principais. Além disso, tem consecutivas participações no Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE B3) da bolsa de valores de São Paulo (B3 – Brasil, Bolsa, Balcão) entre 2005 e 2021. Abordamos a hipótese de que esses empreendimentos além de mitigarem as externalidades de todas as suas unidades produtivas espalhadas pelo território nacional brasileiro, também desenvolveriam ações para a conservação da biodiversidade que visassem a manutenção dos serviços ecossistêmicos aos quais são dependentes. Nossas análises se pautaram nos resultados divulgados pelos empreendimentos em seus relatórios de sustentabilidade, relatórios anuais e outros relatórios públicos oficiais divulgados nos sites das respectivas empresas analisadas.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Seleção de empresas

O ISE (Índice de Sustentabilidade Empresarial) da bolsa de valores do Brasil (B3) - lista cerca de 40 empresas por ano desde 2005. Assim, as empresas listadas no índice por muitos anos consecutivos, foram consideradas como defensoras atuantes das melhores práticas sustentáveis da B3. Nesse sentido, para selecionar as empresas que foram analisadas neste estudo, seguimos três critérios: 1) Ser diretamente dependente dos recursos hídricos para desenvolver suas atividades econômicas; 2) maior número de vezes que participou do ISE da B3 entre 2011 a 2021, comparando dentro do mesmo setor; e 3) maior relevância econômica entre seus pares da carteira do ISE no ano em que foram listados. Assim, foram selecionadas cinco grandes corporações: duas do setor florestal, duas do setor elétrico e uma do setor agropecuário.

As empresas serão apresentadas por siglas referentes às áreas de atuação em seus respectivos setores, sendo AG1 para o setor agropecuário e HP1 e HP2 para o setor hidrelétrico. As duas empresas do setor florestal foram subdivididas em “silvicultura” (FF1 e FF2) e “indústria de conversão” (FC1 e FC2) devido a diferenças significativas de suas atividades e da gestão ambiental nas unidades do setor. Os demais setores avaliados (AG e HP) não apresentam diferenças entre a localização da produção da matéria-prima e sua transformação de forma clara ou demonstrada que sugira interferência na análise. Esta subdivisão no setor florestal deve-se às grandes extensões de áreas de plantações de monoculturas de eucalipto ou pinus para fornecer matéria-prima para sua produção industrial. Portanto, os resultados serão discutidos por sete

empresas, representadas pelas seguintes siglas: AG1, HP1, HP2, FF1 e FC1, FF2 e FC2. Essas empresas juntas possuem 85 unidades de produção em todo o Brasil (Figura 2).

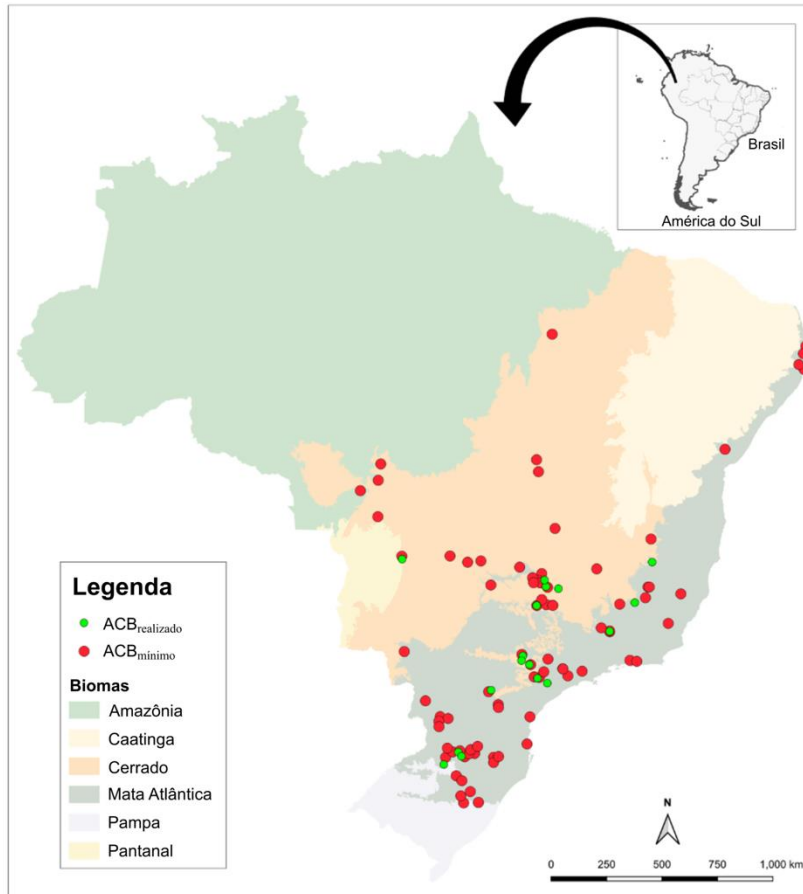


Figura 2. Distribuição das 85 unidades produtivas das cinco empresas avaliadas neste estudo em todo o território brasileiro. Os pontos vermelhos indicam a localização dos impactos ambientais negativos (ACB_{\min}) e os pontos verdes indicam as mitigações desenvolvidas por cada unidade ($ACB_{\text{realizado}}$).

2.2.2 Coleta de dados

Foram investigadas mais de 5.420 páginas de todos os relatórios de sustentabilidade publicados anualmente pelas cinco empresas entre os anos de 2011 a 2018. Além disso, quando explicitamente indicado nos relatórios anuais, também foram analisados outros relatórios públicos oficiais divulgados por essas empresas. Todas as empresas indicaram publicar seus relatórios de acordo com os critérios da *Global Reporting Initiative* (GRI). Desde 2014 essas empresas seguem as diretrizes da 4ª geração (GRI-4G), indicando na seção “Meio Ambiente” do relatório de sustentabilidade o tema biodiversidade, seus impactos, ações e mitigações. Essas empresas divulgam relatórios de forma integrada, em linha com o *International Integrated Reporting Council*.

Toda a coleta de dados foi realizada seguindo o mesmo roteiro de leitura e busca de informações de (REALE *et al.*, 2016; REALE; MAGRO; RIBAS, 2018, 2019), que utilizou uma adaptação da metodologia da certificação LIFE 3.0 (*Lasting Initiative For Earth*) como ferramenta para coleta e análise de dados (Figura 3). Assim, para cada organização, foram coletados dados sobre a receita bruta anual e seus respectivos aspectos ambientais: consumo de água, uso de energia, emissões de gases de efeito estufa (GEE), geração de resíduos sólidos e área ocupada. Além disso, foram coletadas informações sobre as Ações para a Conservação da Biodiversidade realizado (ACB_{realizado}) que as empresas declararam desenvolver, e cada ACB_{realizado} foi listado como pertencente a um único grupo de conservação (G) dentre as quatro possibilidades (G1, G2, G3 e G4), de acordo com a metodologia da certificação LIFE. Existe uma hierarquia de importância entre os grupos, onde quanto mais significativa for a relevância das ações de conservação para os ecossistemas, maior será a pontuação que essa ação receberá, sendo as pontuações originadas em G1 > G2 > G3 > G4. O grupo G1 refere-se à criação de áreas formalmente protegidas, G2 à criação de áreas não formalmente protegidas, G3 para ações de planejamento e G4 para ações de implementação.

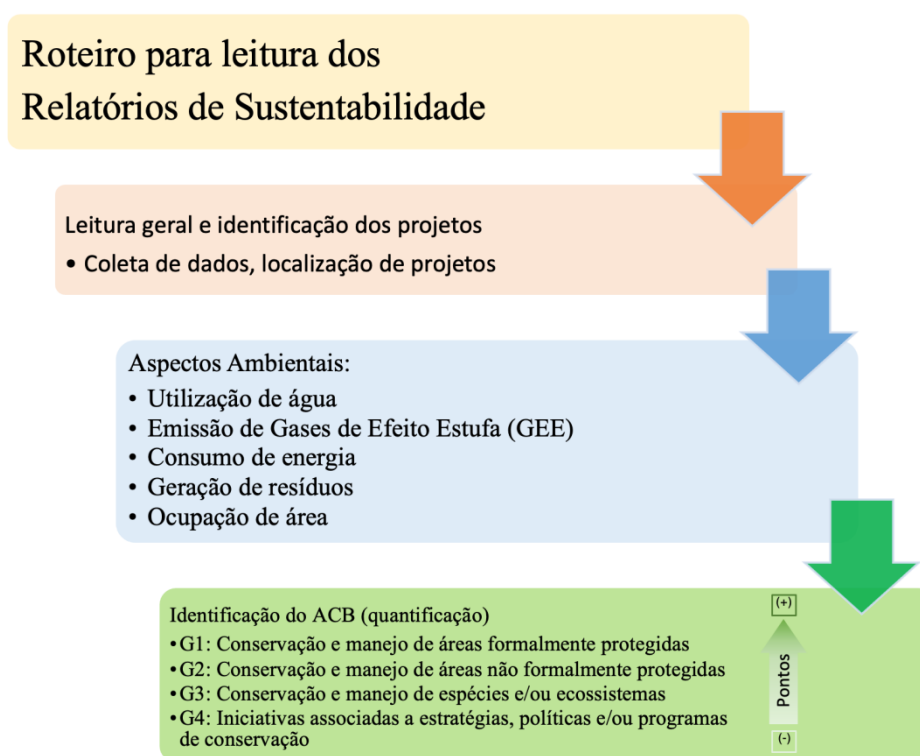


Figura 3. Roteiro para leitura de relatórios de sustentabilidade. AP: Área Protegida. Adaptado de Reale et al. (2018, 2019)

Os relatórios de sustentabilidade são anuais, abrangendo o período de 1 de janeiro a 31 de dezembro do ano de interesse e divulgando todos os resultados financeiros, sociais e ambientais da organização, os objetivos alcançados e as estratégias futuras. Através do roteiro demonstrado (Figura 3), foi possível obter dados sobre os aspectos ambientais, dos resultados financeiros anuais e das ações para a conservação da biodiversidade realizados por cada empresa e inferir para cada unidade através da

proporcionalidade de suas produções. Também foram consultados os inventários de GEE publicados conforme indicado pelo protocolo GEE, além de relatórios sobre certificações socioambientais (estes somente quando expressamente indicados e disponibilizados pela organização em seus respectivos websites).

2.2.3 Análise de dados

Os cálculos foram realizados de acordo com a metodologia da certificação LIFE 3.0, conforme já apresentado por Reale et al. (2019, 2018, 2016). A versão mais atual da metodologia da certificação LIFE pode ser consultada diretamente no site do Instituto LIFE em <https://institutolife.org/pt-br/>. Por essa metodologia, os aspectos ambientais (água, energia, GEE, resíduos sólidos e ocupação de área) foram transformados em índices de quantidade e severidade, que comparam os dados coletados da empresa com dados de relatórios nacionais e regionais. Esses índices possuem mesma escala e são utilizados para calcular o Índice de Impacto da Biodiversidade (IIB), que possui uma escala que varia de zero a 1.000 pontos adimensionais, onde 1.000 indicam a maior pressão sobre a biodiversidade. O IIB é baseado na média dos índices de impacto de cada aspecto ambiental. Em seguida, aplicou-se os fatores de correção nacionais no IIB e na receita bruta da organização para calcular o ACB_{min} , o qual indica a pontuação mínima que a empresa deve desenvolver para minimizar seus impactos ambientais negativos. Portanto, a empresa exercerá um impacto menor sobre a biodiversidade quando o valor das pontuações das Ações para a Conservação da Biodiversidade realizado ($ACB_{realizado}$) pelo empreendimento for igual ou superior ao valor das pontuações do ACB_{min} , ou seja, quando $ACB_{realizado} \geq ACB_{min}$.

A análise gráfica foi desenvolvida utilizando o software R, versão 4.0.2 (2020-06-22). A Figura 2 foi desenvolvido usando QGIS, versão 3.12.3-București. Todas as informações de dados e códigos para o desenvolvimento dos gráficos aqui analisados estão compartilhadas abertamente no link do GitHub: <https://github.com/realericardo/PhDPaper01.git>.

2.2.4 Ações para a Conservação da Biodiversidade (ACB)

O roteiro apresentado na Figura 3 foi utilizado para orientar e padronizar a coleta de dados durante as leituras dos relatórios. Cada ação ambiental descrita nos relatórios foi identificada conforme o fluxograma da Figura 4 abaixo, que indica como cada ACB é classificado em um único grupo de conservação (G), dentre os quatro grupos possíveis conforme recomendado pela metodologia da certificação LIFE em sua diretriz de conservação: “Manter a composição, estrutura e função dos ecossistemas” (Instituto LIFE, 2014a). Assim, são priorizadas as iniciativas com maior potencial para atender a diretriz LIFE em menor tempo (INSTITUTO LIFE, 2014b, 2014c).

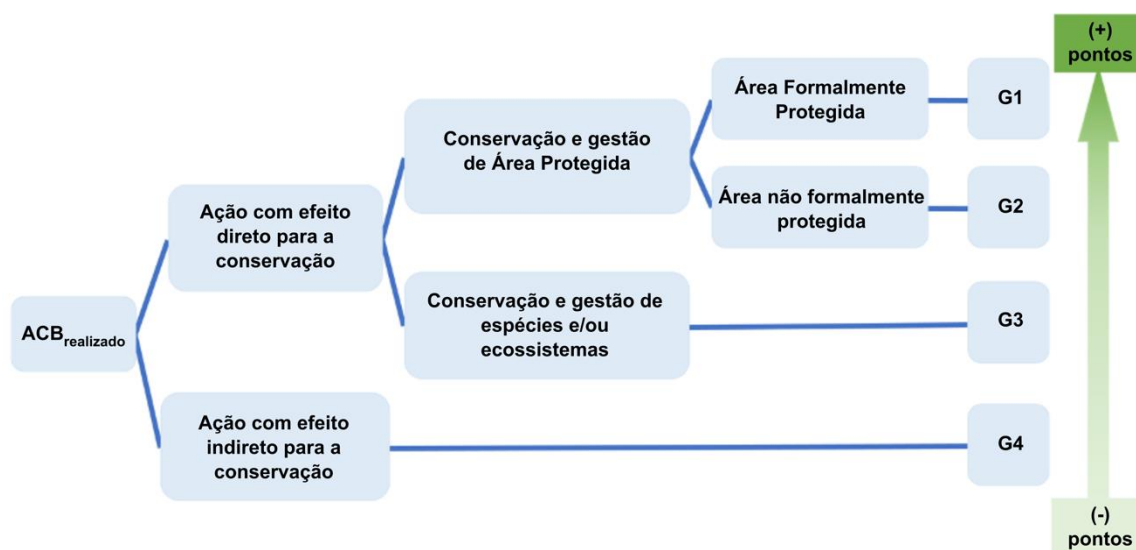


Figura 4. Roteiro para identificar e classificar as Ações para a Conservação da Biodiversidade (ACB) em um único Grupo de Conservação (G) para posterior qualificação e pontuação da ACB. G1 - Conservação e gestão de áreas formalmente protegidas; G2 - Conservação e gestão de áreas protegidas não formalmente; G3 - Conservação e manejo de espécies e/ou ecossistemas; G4 - Iniciativas associadas a estratégias, políticas e/ou programas de conservação. Fonte: LIFE-BR-TG02-3.0-Guia Técnico Português

A metodologia da certificação LIFE no âmbito das auditorias considera apenas o $ACB_{realizado}$ voluntariamente pela empresa, não pontuando as ações desenvolvidas em função das exigências da legislação ambiental. No entanto, aplicamos a metodologia da certificação LIFE de forma adaptada neste estudo, considerando todos os ACB divulgados nos relatórios públicos. Essa adaptação ocorreu porque Reale et al. (2019, 2018) indicam que empresas reconhecidas como “sustentáveis” pelo mercado desenvolveram poucas ou nenhuma ações de conservação voluntariamente. Assim, optamos por avaliar todas as ações dos empreendimentos, analisando o período de 2011 a 2018. Até o momento, a metodologia da certificação LIFE é a única métrica disponível no mundo que possibilita realizar esse tipo de quantificação, que tem potencial para ser aplicado em qualquer empresa e localidade do mundo, após sofrer correções locais e adaptações à metodologia referente aos marcos nacionais de gestão ambiental.

Por isso, quantificamos e comparamos a pressão sobre a biodiversidade que as empresas geram e o quanto de ações de conservação essas empresas estão desenvolvendo para mitigar seus impactos ambientais negativos. Portanto, aqui, consideramos as ações voluntárias e obrigatórias. A criação de Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal (RL), dois requisitos legais no Brasil, foi classificada como ações de conservação indireta pertencentes a ações de planejamento como “cadastros” G1.P ou ações de implementação como “cadastros” G1.I (Tabela 1).

Tabela 1. Grupos de conservação, cadastro e qualificadores. O passo final para quantificar o valor da pontuação do ACB_{realizado} pelas empresas

G1 – Conservação e manejo de áreas formalmente protegidas		
Cadastro	G1.C - Criação ou adoção de áreas protegidas	Qualificador(es)
G1.C1	Criar ou adotar áreas protegidas.	1, 3, 6, 10, 16
G1.P - Planejamento de ações para a conservação da biodiversidade em área protegida		
G1.P1	Elaborar plano de manejo e/ou planejamento de ações para a conservação da biodiversidade na área protegida.	3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 16
Cadastro		
G1.I - Implementação de ações de conservação e manejo na área protegida		
G1.I1	Implementar ações de conservação e manejo da biodiversidade na área protegida.	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 16
G1.I2	Implementar ações de operacionalização da área para a conservação da biodiversidade.	10, 13, 15, 16
G2 – Conservação e manejo de áreas não formalmente protegidas		
Cadastro	G2.C - Criação ou adoção de áreas protegidas	Qualificador(es)
G2.C1	Criar ou adotar áreas protegidas.	1, 3, 6, 10, 16
Cadastro		
G2.P - Planejamento de ações para a conservação da biodiversidade em área protegida		
G2.P1	Elaborar plano de manejo e/ou planejamento de ações para a conservação da biodiversidade na área protegida.	3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 16
Cadastro		
G2.I - Implementação de ações de conservação e manejo em área protegida		
G2.I1	Implementar ações de conservação e manejo da biodiversidade na área protegida.	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 16
G2.I2	Implementar ações de operacionalização da área para a conservação da biodiversidade.	10, 13, 15, 16
G3 - Conservação e manejo de espécies e/ou ecossistemas		
Cadastro	G3.P - Planejamento de ações de conservação e manejo de espécies e/ou ecossistemas	Qualificador(es)
G3.P1	Elaborar planejamento de ações para conservação e manejo de espécies e/ou ecossistemas.	3, 4, 5, 6, 7, 15, 16
Cadastro		
G3.I – Implementação de ações de conservação e manejo de espécies e/ou ecossistemas		
G3.I1	Implementar ações de conservação e manejo de espécies e/ou ecossistemas.	3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 14, 16
G4 – Iniciativas associadas a estratégias, políticas e/ou programas para a conservação		
Cadastro	G4.P - Planejamento de ações estratégicas e políticas para a conservação e/ou uso sustentável da biodiversidade	Qualificador(es)
G4.P1	Elaborar planejamento de iniciativa estratégica ou política para a conservação e/ou uso sustentável da biodiversidade.	2, 3, 4, 5, 6, 7, 16
Cadastro		
G4.I - Implementação de ações estratégicas e políticas para a conservação e/ou uso sustentável da biodiversidade		
G4.I1	Implementar/apoiar projetos/programas estratégicos e/ou políticas públicas que contribuam para a conservação e/ou uso sustentável da biodiversidade. ¹	2, 3, 4, 5, 7, 10, 16
G4.I2	Implementar/apoiar campanhas de comunicação e/ou mobilização social que contribuam para a conservação e/ou uso sustentável da biodiversidade.	2, 11
G4.I3	Estabelecer/manter parcerias, convênios e/ou similares com instituições de pesquisa, órgãos governamentais e/ou ONGs que contribuam para a conservação e/ou uso sustentável da biodiversidade.	2, 11
G4.I4	Implementar/apoiar e/ou disponibilizar informações para bancos de dados, coleções técnicas e/ou científicas referentes à conservação e/ou uso sustentável da biodiversidade.	2, 3, 4, 5, 7, 16
G4.I5	Realizar/apoiar ações de mapeamento, elaboração e atualização de bases cartográficas e cadastramento de áreas destinadas à conservação e uso sustentável da biodiversidade.	2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 16
G4.I6	Implementar/apoiar projetos/programas de conservação ex situ.	2, 4, 5
G4.I7	Implementar/apoiar projetos/programas educacionais para a conservação e/ou uso sustentável da biodiversidade.	2, 12
G4.I8	Realizar/apoiar estudos e/ou pesquisas que contribuam para a conservação, uso sustentável e/ou mitigação de impactos sobre a biodiversidade nativa.	2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 16
G4.I9	Implementar/apoiar sistemas alternativos de produção, que minimizem os impactos na biodiversidade quando comparados aos sistemas tradicionais de produção. ²	2

¹ Iniciativas institucionais e/ou governamentais que visam dar escala as ações de conservação. Ex.: projetos de REDD; projetos para Pagamento por Serviços Ambientais (PSA); etc.

² SAF's, SAFRA's, orgânicos, permacultura, conservação on farm e projetos agroecológicos em geral.

Fonte: Instituto LIFE. Guia Técnico LIFE-BR-TG02-3.0-Português

Assim, cada ACB identificado durante as leituras dos relatórios anuais foi classificado em um dos 20 possíveis “cadastros” únicos da metodologia da certificação LIFE. Após identificar a qual dos quatro grupos de conservação (G) o ACB pertence (Figura 4), qualificamos a ação em G1 (ações para criação de

áreas protegidas); G2 (ações para adoção de áreas protegidas); G3 (planejamento de ações); ou G4 (implementação da ação). Em seguida, foi identificado um dos três “temas”: (C) para criação de áreas; (I) para implementação de ações; ou (P) para ações de planejamento. Após selecionar os “cadastros” corretos, são aplicados os qualificadores conforme indicados, que irão valorar o $ACB_{realizado}$. A Tabela 2 mostra quais são os qualificadores pré-determinados para cada “cadastro” na Tabela 1. As pontuações podem ser maiores ou menores dependendo da qualidade das informações mínimas divulgadas nos relatórios, que, se informadas corretamente, irão fomentar os dados para quantificar corretamente a pontuação total desta ação. Caso contrário, a pontuação $ACB_{realizado}$ será menor ou até mesmo desconsiderada.

Tabela 2. Qualificadores LIFE (Q)

Qualificador	Nome	Descrição
Q1	Cobertura de vegetação nativa em bom estado de conservação	Classes percentuais de recobrimento com vegetação nativa em bom estado de conservação (>50% a =100%)
Q2	Abrangência do programa ou projeto	Atuação: nacional, regional, estadual ou local
Q3	Importância da área para a conservação	Áreas apontadas como importantes para conservação (MMA, Portaria 09/2007)
Q4	Categoria de espécies ameaçadas	Categoria de ameaça segundo a lista mais específica que existir à época (municipal, Estadual ou nacional)
Q5	Apêndices CITES (2014)	Apêndice I, II ou III
Q6	Categoria de manejo das áreas componentes do mosaico	Categorias das UC
Q7	Categoria de potencial invasivo de espécies exóticas	Categorias de invasão de espécies exóticas
Q8	Distância e largura média da conexão	Largura: <30m a >200m
Q9	Estágio de sucessão	Inicial, médio ou avançado
Q10	Categorias de manejo da Área Protegida	Áreas protegidas (SNUC 2000) e Terras Indígenas e categoria IUCN 2008
Q11	Duração das ações	Duração em anos
Q12	Frequência e continuidade de ações de educação para a conservação	Frequência e continuidade
Q13	Vinculação a um plano de manejo ou equivalente	Vinculada a um plano de manejo ou gestão similar
Q14	Finalidade da recuperação	Recuperação ecológica ou para outros fins
Q15	Tamanho da área	Hectares: 200 a >4 milhões
Q16	Importância da Ecorregião (segundo dados do MMA)	Todos os biomas brasileiros (terrestres e marinhos).

Fonte: Instituto LIFE. Guia técnico LIFE-BR-TG02-3.0-Português

2.3 Resultados e Discussão

As sete organizações avaliadas (AG1, FC1, FF1, FC2, FF2, HP1, HP2) totalizam 85 unidades produtivas espalhadas por cinco biomas brasileiros: Mata Atlântica (55%), Cerrado (38%), Pampa (5%), Caatinga (1%) e Amazônia (1%). Os dados e resultados dos índices de impacto de cada aspecto ambiental, Índice de Impacto da Biodiversidade (IIB), ACB_{\min} , $ACB_{\text{realizado}}$, porcentagem de mitigação de impacto e dados relacionados à localização, podem ser consultados neste [link](#). Apresenta-se também o $ACB_{\text{realizado}}$ de acordo com os “cadastros” de formação da metodologia da certificação LIFE. A Figura 2 resume os locais dos ACB_{\min} e $ACB_{\text{realizado}}$ quantificados neste estudo.

Esperávamos que as empresas reduzissem as pressões de impacto em todas as unidades de produção entre os anos de 2011 a 2018. Isso significa que os resultados para cada unidade de produção deveriam indicar sucessivas reduções de ACB_{\min} e aumentos sucessivos de $ACB_{\text{realizado}}$ ao longo do tempo. No entanto, não foram detectadas variações nesse sentido das pontuações do ACB_{\min} e $ACB_{\text{realizado}}$ para o período avaliado. As pequenas mudanças nas pontuações do ACB ocorreram devido à instabilidade política, econômica e social do Brasil. Além disso, algumas unidades produtivas foram fechadas ou a produção foi redirecionada para outra unidade. As unidades fechadas foram desconsideradas nos anos subsequentes, diminuindo a pontuação geral tanto do ACB_{\min} quanto do $ACB_{\text{realizado}}$.

Na Figura 5 mostramos uma comparação entre quantas pontuações de ACB_{\min} cada unidade precisa alcançar e o quanto foi alcançado, calculadas pelo percentual de $ACB_{\text{realizado}}$ por essas empresas $\left[\left(\frac{ACB_{\text{realizado}}}{ACB_{\min}}\right) \times 100\right]$. O comprimento do boxplot indica a variação anual dessa unidade ao longo do tempo de análise, que utiliza a bacia hidrográfica, ecorregião e bioma para quantificar cada ACB .

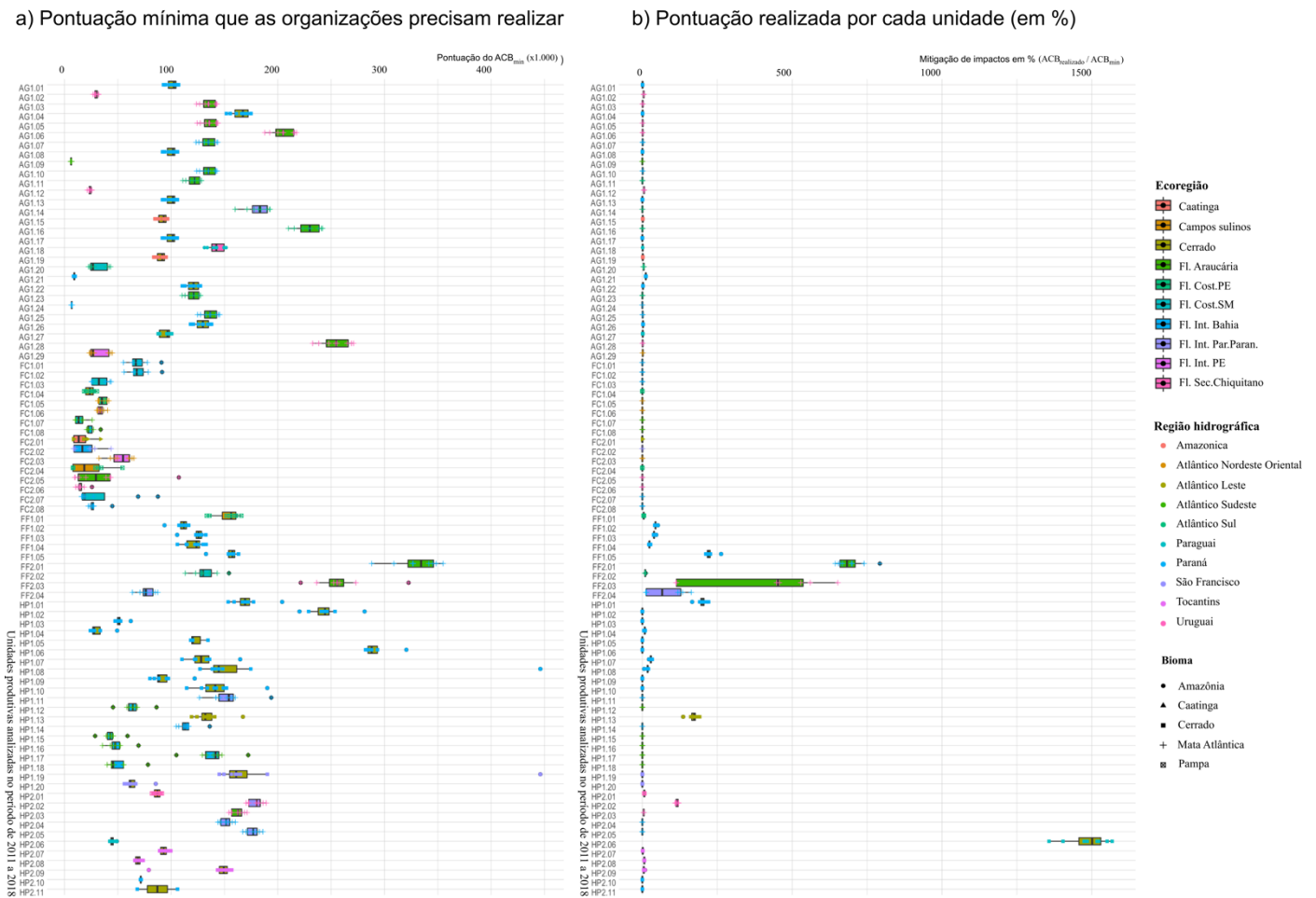


Figura 5. A pontuação do ACB_{min} considera os critérios de ecoregião, região hidrográfica, aspectos ambientais e receita bruta anual da empresa (calculada em dólares norte-americanos, utilizando a unidade dólar PTAX do Banco Central do Brasil por ano). A mitigação foi calculada por $\left[\left(\frac{ACB_{realizado}}{ACB_{min}}\right) \times 100\right]$ para todas as unidades de produção. Poucas unidades desenvolveram ACB, mesmo sendo esses empreendimentos dependentes de recursos naturais e considerados como tendo as melhores práticas sustentáveis da bolsa brasileira. Isso indica que as empresas estão tentando minimizar seus impactos ambientais negativos devido a fatores econômicos, não para evitá-los, conforme explicado no texto principal.

Aproximadamente 90% de todas as unidades de produção avaliadas não desenvolveram pontuações suficientes de $ACB_{realizado}$ para mitigar o ACB_{min} . Além disso, cerca de metade de todas as unidades avaliadas anualmente não desenvolveram pontuações $ACB_{realizado}$ ($ACB_{realizado} = 0$) e 80% de todas as unidades mitigaram entre zero e 15% de seus impactos ambientais negativos. Todas as pontuações alcançadas pelo ACB foram calculadas seguindo as ações ambientais descritas nos relatórios de sustentabilidade e outros documentos públicos, desde que explicitamente citados nos referidos relatórios anuais. As pontuações $ACB_{realizado}$ foram computadas apenas para os anos em que foram descritas nos relatórios, utilizando-se a Tabela 2 como referência dos qualificadores.

No período analisado, dentre as 85 unidades avaliadas, apenas cinco desenvolveram ações que mitigaram entre 15% e 50% do ACB_{min} , e apenas sete unidades produtivas mitigaram 100% dos impactos ambientais negativos via $ACB_{realizado}$. Embora as empresas relatem sucesso na minimização do uso e consumo de recursos naturais, nenhuma delas indicou que desenvolveria ACB para restabelecer os recursos

naturais consumidos como metas futuras de acordo com o crescimento da empresa. Ou seja, não há estratégias dentro do setor empresarial que combinem o crescimento econômico com a expansão das ações de conservação. Mesmo quando existem essas ações conservacionistas, elas não são suficientes para mitigar os impactos ambientais negativos mínimos calculados pela metodologia de certificação LIFE.

Além disso, percebe-se que as pontuações ACB_{\min} e $ACB_{\text{realizado}}$ permanecem constantes ao longo do período 2011-2018. Isso indica que as empresas tendem a não desenvolver atividades onde já não desenvolviam. Simultaneamente, nas unidades que possuem $ACB_{\text{realizado}}$ em andamento, elas as realizam em função das exigências da legislação ambiental brasileira, que possui diferentes restrições para diferentes setores da economia e, conseqüentemente, exerce diferentes pressões sobre a governança corporativa e a quantidade de pontos resultantes do ACB. Essa diferenciação ocorre mesmo dentro de um mesmo setor, como na silvicultura (FF) e na indústria de conversão florestal (FC).

As unidades produtivas dos setores de silvicultura e hidrelétricas apresentam as maiores pontuações $ACB_{\text{realizado}}$, representando, respectivamente, 71% e 28% do total $ACB_{\text{realizado}}$ calculado neste trabalho. No entanto, essas pontuações estão mal distribuídas, onde apenas a unidade FF2.01 desenvolve sozinha 43% de todos os $ACB_{\text{realizado}}$ calculados. Além disso, a unidade HP2.06 desenvolve 12% do ACB total. Juntas, essas duas unidades mitigaram aproximadamente 35% de todo o ACB_{\min} calculado, mas de forma desproporcional entre as diferentes ecorregiões dentro dos biomas brasileiros. Os $ACB_{\text{realizado}}$ pela unidade FF2.01 está localizado na ecorregião da floresta de Araucária no bioma Mata Atlântica e na bacia do rio Paraná (com apenas quatro unidades de produção analisadas neste estudo), enquanto os $ACB_{\text{realizado}}$ por HP2.06 está localizado na ecorregião do Cerrado no bioma Cerrado no Bacia do rio Paraguai (Figura 5), com apenas duas unidades de produção (ver Figura Suplementar 7). Assim, há uma concentração das ações de conservação em poucas áreas, enquanto outras regiões não recebem nenhuma pontuação ou ação de conservação. Por exemplo, na Figura Suplementar 7 mostramos que das 24 regiões combinadas analisadas por Ecorregião e Região Hidrográfica, apenas duas estão recebendo ACB. As outras 22 regiões (mais de 90%) não receberam o $ACB_{\text{realizado}}$ para mitigar seus impactos ambientais negativos. Outras regiões do mesmo bioma e região hidrográfica com unidades da mesma empresa estão em déficit de mitigação. Surpreendentemente, a indústria de conversão (FC1 e FC2) não desenvolveu nenhuma ação de conservação ($ACB_{\text{realizado}}=0$). Em contrapartida, a unidade FF1.05 da silvicultura desenvolve em média, por ano, 225% de mitigações de 2011 a 2018, enquanto todas as outras unidades FF1 não atingem 50% de mitigação. Já a empresa FF2 possui três unidades que mitigam mais de 100% de seus impactos ambientais negativos, sendo que uma delas mitiga mais de 700% em média no período analisado.

Em média, 75% das unidades produtivas da empresa HP1 não realizam ou divulgam ações de conservação, mesmo considerando as ações exigidas pela legislação ambiental brasileira, considerando apenas as mencionadas nos relatórios. Para uma empresa receber nota zero no $ACB_{\text{realizado}}$ pela metodologia de certificação LIFE, é necessário omitir todos os dados de conservação (caso esteja desenvolvendo algo). Em outras palavras, nota zero significa total falta de $ACB_{\text{realizado}}$ pela unidade produtiva da empresa ou total falta de divulgação de dados sobre as ações desenvolvidas. Apenas a empresa FF2 (silvicultura) possui mais de 50% de suas unidades, mitigando mais de 100% do ACB_{\min} calculado. No entanto, todas as ações

referem-se às exigências da legislação ambiental brasileira ou ao perfil da empresa como requisitos de certificação ambiental necessários para a comercialização de produtos e inserção no mercado internacional.

Nenhuma empresa indicou ter desenvolvido ações de conservação para a biodiversidade para restaurar ecossistemas em benefício da prestação de serviços ecossistêmicos essenciais para suas atividades econômicas, o que indicaria um caminho para o crescimento econômico sustentável. A média de pontuações mitigadas da empresa AG1 é de 0,57% para todo o período, mas as médias de ACB_{min} foram de 35,5% e consumiram 42% do total de água avaliado (Tabela 3). Apesar disso, a empresa não desenvolve o $ACB_{realizado}$ para mitigar o ACB_{min} . Ou seja, é a empresa com o segundo maior consumo de água, mas a que menos desenvolve ações que possam contribuir para a reposição dos estoques de água nos ecossistemas. Todas as 29 unidades do AG1 apresentam mitigações insignificantes e próximas de zero.

Tabela 3. A média total de cada empresa comparada com a média total de cada aspecto

Empresa	Área	Vendas brutas	GEE	Energia	Água	Total ACB_{min}	Total $ACB_{realizado}$
AG1	2,21%	49,08%	19,46%	14,17%	41,77%	35,50%	0,57%
FC1	0,01%	2,14%	1,16%	0,73%	0,53%	3,44%	0,00%
FC2	0,02%	0,64%	1,65%	1,20%	3,12%	2,52%	0,00%
FF1	14,38%	3,97%	13,23%	3,90%	3,01%	7,45%	8,98%
FF2	38,91%	8,27%	22,19%	18,36%	47,07%	8,97%	61,91%
HP1	31,01%	27,13%	42,23%	36,40%	0,67%	27,93%	11,78%
HP2	13,47%	8,78%	0,08%	25,24%	3,83%	14,19%	16,76%
Total	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

No total, as empresas FF1, FF2, HP1 e HP2 são responsáveis por mais de 99% das pontuações totais calculadas no $ACB_{realizado}$. No entanto, apenas oito unidades de produção representam 60% da pontuação total no ACB_{min} calculado. Juntas, as outras 77 unidades mitigam apenas 3% do total ACB_{min} , demonstrando que há uma lacuna significativa nas ações que são transversais aos sistemas de gestão das empresas, mesmo aquelas que tiveram reconhecimento de melhor desempenho em desenvolvimento sustentável pelo mercado indicado pelo maior tempo nas listas do Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da Bolsa de Valores de São Paulo/Brasil.

Todas as empresas aqui avaliadas indicaram que seus Sistemas de Gestão Ambiental (SGA) buscam reduzir o consumo e os usos dos aspectos ambientais, procurando utilizar a melhor tecnologia disponível para atingir as metas anuais de redução. Embora esses objetivos sejam essenciais e benéficos para a sociedade, o meio ambiente e a economia, eles não são suficientes para minimizar a pressão sobre os

ecossistemas. Ou seja, seus modelos de gestão sustentável baseiam-se na minimização dos impactos exclusivamente pela redução do consumo de recursos naturais sem desenvolver ações de reposição dos recursos naturais explorados, essenciais para o funcionamento de todo o setor. Por exemplo, Liang et al. (2016) demonstraram que a perda de 10% na diversidade arbórea leva a uma diminuição de 3% na produtividade do ecossistema da área analisada. Além disso, os mesmos autores indicaram que os custos para a manutenção da biodiversidade são entre duas e seis vezes menores do que o custo da perda de produtividade.

Os efeitos danosos da perda de biodiversidade e das mudanças climáticas na economia global já são sentidos e calculados, como demonstrado por Ortiz-Bobea et al. (2021). Os autores mostram que a produtividade agrícola mundial diminuiu 21% desde 1961 devido às mudanças climáticas antropogênicas. Na América Latina tropical, África e Caribe, a redução foi de 26% a 34% devido às mudanças climáticas. Isso significa que, apesar do crescente número de empresas sustentáveis em todo o planeta com foco no desenvolvimento de atividades que minimizem o uso de aspectos ambientais, as metas de sustentabilidade do mercado não estão focadas na recuperação de ambientes degradados e na reposição da biodiversidade.

Assim, a conservação da biodiversidade deve ser entendida como a base primária dos serviços ecossistêmicos e, portanto, o foco de todos os planos de ação e metas indicadas pelas metas de desenvolvimento da sustentabilidade. Portanto, dada a importância da biodiversidade na manutenção dos serviços de provisão ecossistêmica e que estes são importantes para os serviços culturais, de apoio e regulatórios, a ACB deve ser colocada no centro do tripé da sustentabilidade (economia, meio ambiente e social), conforme proposto na Figura 6, uma vez que para realizar qualquer atividade de conservação da biodiversidade, são necessários atores ambientais, econômicos, sociais e de governança.

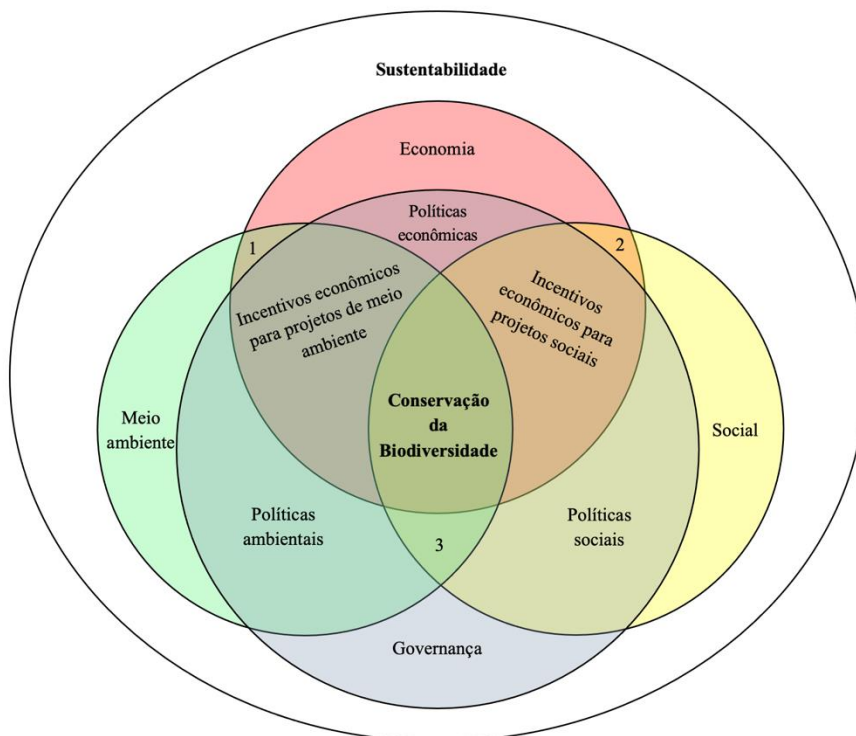


Figura 6. Comumente, a “sustentabilidade” é representada como o concêntrico de Economia, Meio Ambiente e Social. No entanto, aqui consideramos a “sustentabilidade” como um nível superior, orientando a consonância entre essas atividades. No entanto, para alcançar um desenvolvimento genuinamente sustentável, a “conservação da biodiversidade” deve ser considerada como o foco de todas as atividades, pois todas elas têm, em última análise, profunda dependência da diversidade biológica:

- 1 – Interações dependentes entre Meio Ambiente e Economia;
- 2 – Interações dependentes entre Economia e Social;
- 3 – Interações dependentes entre Social, Meio Ambiente e Governança

Mesmo que as metas de redução dos aspectos ambientais sejam reduzidas, o consumo de recursos naturais aumentará sucessivamente devido à crescente demanda por produtos, conforme indicado pelo “Paradoxo de Jevons” (JEVONS, 1866). Portanto, quaisquer metas alcançadas exclusivamente para mitigar os impactos, reduzindo ou minimizando o consumo de recursos naturais, nunca serão suficientes para evitar a degradação dos ecossistemas. Assim, é preciso reconstruir a natureza, planejando nossa economia com base nos serviços ecossistêmicos como lastro do crescimento econômico. Portanto, as empresas devem desenvolver ações para a conservação da biodiversidade para promover benefícios diretos aos ecossistemas e, conseqüentemente, promover a estabilidade ambiental e aumentar os serviços ecossistêmicos, indispensáveis à manutenção da economia global. O conceito de “conservação da biodiversidade” deve ser inserido no centro da tomada de decisão sobre o desenvolvimento sustentável, conforme indicado na Figura 6, desenvolvendo o ACB em todos os aspectos das ações de sustentabilidade, sejam sociais, econômicas ou ambientais.

2.4 Conclusão

As empresas aqui avaliadas não demonstraram desenvolver mitigações de impactos ambientais negativos em suas unidades produtivas. Além disso, não desenvolveram ações para manter os serviços ecossistêmicos dos quais dependem. Portanto, a hipótese aqui abordada não foi aceita.

Os benefícios dos ecossistemas são igualmente acessíveis a todos, portanto sua conservação e restauração devem ser desenvolvidas proporcionalmente ao seu consumo. Organizações maiores poderiam liderar consórcios focados no ACB mais adequado às atividades dos consorciados, o que poderia gerar serviços ecossistêmicos como lastro para um crescimento econômico que respeite a resiliência dos ecossistemas, o que beneficiaria diretamente as atividades econômicas. Dessa forma, projetos de governança poderiam ser elaborados para indicar qual deve ser o ACB a ser desenvolvido para que os resultados positivos nos ecossistemas ocorram antes do crescimento econômico, como escudo para evitar danos ambientais. Assim, a conservação da biodiversidade precisa ser entendida como uma articulação de todos os objetivos de desenvolvimento da sustentabilidade, dada a sua importância para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Assim, a reconstrução da funcionalidade dos ecossistemas aliada à velocidade de consumo dos recursos naturais deve respeitar a resiliência do ecossistema, orientando um crescimento econômico sustentável e biodiverso.

Como a economia continuará crescendo, a degradação ambiental pelo consumo de recursos naturais também aumentará (“Paradoxo de Jevons”). Assim, para interromper o Paradoxo de Jevons, as empresas devem implementar o ACB de forma que seja considerado a nova base para o crescimento econômico empresarial, baseado nas necessidades históricas da empresa por serviços ecossistêmicos e aliado à redução do consumo de recursos naturais, acelerando a resiliência e a resistência dos ecossistemas. Metodologias de certificação ambiental como as preconizadas pelo Instituto LIFE são essenciais para facilitar a tomada de decisão sobre que tipo de ações as organizações e empresas devem fazer para mitigar os seus impactos ambientais negativos para salvar ou restaurar a biodiversidade, reduzindo a pressão sobre os ecossistemas com crescimento econômico sustentado. Além disso, o rigor da legislação ambiental é essencial para orientar os avanços na conservação e minimizar os danos ao meio ambiente.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através das bolsas FAPESP [nº2017/24013-5](#) e [nº2019/15933-9](#). Também contou com apoio (bolsa) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

- ADDISON, P. F. E.; BULL, J. W.; MILNER-GULLAND, E. J. Using conservation science to advance corporate biodiversity accountability. **Conservation Biology**, v. 33, n. 2, p. 307–318, 5 abr. 2019.
- ARLIDGE, W. N. S.; BULL, J. W.; ADDISON, P. F. E.; BURGASS, M. J.; GIANUCA, D.; GORHAM, T. M.; JACOB, C.; SHUMWAY, N.; SINCLAIR, S. P.; WATSON, J. E. M.; WILCOX, C.; MILNER-GULLAND, E. J. A Global Mitigation Hierarchy for Nature Conservation. **BioScience**, v. 68, n. 5, p. 336–347, maio 2018.
- CARDINALE, B. J.; DUFFY, J. E.; GONZALEZ, A.; HOOPER, D. U.; PERRINGS, C.; VENAIL, P.; NARWANI, A.; MACE, G. M.; TILMAN, D.; WARDLE, D. A.; KINZIG, A. P.; DAILY, G. C.; LOREAU, M.; GRACE, J. B.; LARIGAUDERIE, A.; SRIVASTAVA, D. S.; NAEEM, S. Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, v. 486, n. 7401, p. 59–67, 7 jun. 2012.
- CHAPIN III, F. S.; ZAVALA, E. S.; EVINER, V. T.; NAYLOR, R. L.; VITOUSEK, P. M.; REYNOLDS, H. L.; HOOPER, D. U.; LAVOREL, S.; SALA, O. E.; HOBBI, S. E.; MACK, M. C.; DÍAZ, S. Consequences of changing biodiversity. **Nature**, v. 405, n. 6783, p. 234–242, 11 maio 2000.
- COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R. V.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTON, P.; VAN DEN BELT, M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, v. 387, n. 6630, p. 253–260, maio 1997.
- COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; SUTTON, P.; VAN DER PLOEG, S.; ANDERSON, S. J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R. K. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, n. 1, p. 152–158, maio 2014.
- COSTANZA, R.; FISHER, B.; MULDER, K.; LIU, S.; CHRISTOPHER, T. Biodiversity and ecosystem services: A multi-scale empirical study of the relationship between species richness and net primary production. **Ecological Economics**, v. 61, n. 2–3, p. 478–491, mar. 2007.
- FIEDLER, T.; PITMAN, A. J.; MACKENZIE, K.; WOOD, N.; JAKOB, C.; PERKINS-KIRKPATRICK, S. E. Business risk and the emergence of climate analytics. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 2, p. 87–94, 8 fev. 2021.
- HAUTIER, Y.; ISBELL, F.; BORER, E. T.; SEABLOOM, E. W.; HARPOLE, W. S.; LIND, E. M.; MACDOUGALL, A. S.; STEVENS, C. J.; ADLER, P. B.; ALBERTI, J.; BAKKER, J. D.; BRUDVIG, L. A.; BUCKLEY, Y. M.; CADOTTE, M.; CALDEIRA, M. C.; CHANETON, E. J.; CHU, C.; DALEO, P.; DICKMAN, C. R.; DWYER, J. M.; ESKELINEN, A.; FAY, P. A.; FIRN, J.; HAGENAH, N.; HILLEBRAND, H.; IRIBARNE, O.; KIRKMAN, K. P.; KNOPS, J. M. H.; LA PIERRE, K. J.; MCCULLEY, R. L.; MORGAN, J. W.; PÄRTEL, M.; PASCUAL, J.; PRICE, J. N.; PROBER, S. M.; RISCH, A. C.; SANKARAN, M.; SCHUETZ, M.; STANDISH, R. J.; VIRTANEN, R.; WARDLE, G. M.; YAHDJIAN, L.; HECTOR, A. Local loss and spatial homogenization of plant diversity reduce ecosystem multifunctionality. **Nature Ecology & Evolution**, v. 2, n. 1, p. 50–56, 4 jan. 2018.
- HAUTIER, Y.; TILMAN, D.; ISBELL, F.; SEABLOOM, E. W.; BORER, E. T.; REICH, P. B. Anthropogenic environmental changes affect ecosystem stability via biodiversity. **Science**, v. 348, n. 6232, p. 336–340, 17 abr. 2015.
- HERNÁNDEZ-BLANCO, M.; COSTANZA, R.; ANDERSON, S.; KUBISZEWSKI, I.; SUTTON, P. Future scenarios for the value of ecosystem services in Latin America and the Caribbean to 2050. **Current Research in Environmental Sustainability**, v. 2, p. 100008, 1 dez. 2020.

- HOOPER, D. U.; CHAPIN, F. S.; EWEL, J. J.; HECTOR, A.; INCHAUSTI, P.; LAVOREL, S.; LAWTON, J. H.; LODGE, D. M.; LOREAU, M.; NAEEM, S.; SCHMID, B.; SETÄLÄ, H.; SYMSTAD, A. J.; VANDERMEER, J.; WARDLE, D. A. EFFECTS OF BIODIVERSITY ON ECOSYSTEM FUNCTIONING: A CONSENSUS OF CURRENT KNOWLEDGE. *Ecological Monographs*, v. 75, n. 1, p. 3–35, 1 fev. 2005.
- INSTITUTO LIFE. **LIFE-BR-CS-3.0-Português: PADRÕES DE CERTIFICAÇÃO LIFE. Princípios e Critérios da Certificação LIFE.** [s.l: s.n.].
- INSTITUTO LIFE. **LIFE-BR-TG01-3-0-Portugues: GUIA TÉCNICO LIFE – 01. Definição de desempenho mínimo em Ações de Conservação da Biodiversidade - Abordagem Quantitativa da Certificação LIFE.** Curitiba: Instituto LIFE, 2014b. .
- INSTITUTO LIFE. **LIFE-BR-TG02-3-0-Portugues: GUIA TÉCNICO LIFE – 02. Avaliação do Desempenho em Ações de Conservação da Biodiversidade.** Curitiba: Instituto LIFE, 2014c. .
- ISBELL, F.; CALCAGNO, V.; HECTOR, A.; CONNOLLY, J.; HARPOLE, W. S.; REICH, P. B.; SCHERER-LORENZEN, M.; SCHMID, B.; TILMAN, D.; VAN RUIJVEN, J.; WEIGELT, A.; WILSEY, B. J.; ZAVALETA, E. S.; LOREAU, M. High plant diversity is needed to maintain ecosystem services. *Nature*, v. 477, n. 7363, p. 199–202, 10 set. 2011.
- ISBELL, F.; CRAVEN, D.; CONNOLLY, J.; LOREAU, M.; SCHMID, B.; BEIERKUHNEIN, C.; BEZEMER, T. M.; BONIN, C.; BRUELHEIDE, H.; DE LUCA, E.; EBELING, A.; GRIFFIN, J. N.; GUO, Q.; HAUTIER, Y.; HECTOR, A.; JENTSCH, A.; KREYLING, J.; LANTA, V.; MANNING, P.; MEYER, S. T.; MORI, A. S.; NAEEM, S.; NIKLAUS, P. A.; POLLEY, H. W.; REICH, P. B.; ROSCHER, C.; SEABLOOM, E. W.; SMITH, M. D.; THAKUR, M. P.; TILMAN, D.; TRACY, B. F.; VAN DER PUTTEN, W. H.; VAN RUIJVEN, J.; WEIGELT, A.; WEISSER, W. W.; WILSEY, B.; EISENHAUER, N. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, v. 526, n. 7574, p. 574–577, 14 out. 2015.
- JEVONS, W. S. **The Coal Question; An Inquiry concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines.** 2. ed. London: Macmillan and Co, 1866. 179 p.
- LIANG, J.; CROWTHER, T. W.; PICARD, N.; WISER, S.; ZHOU, M.; ALBERTI, G.; SCHULZE, E.-D.; MCGUIRE, A. D.; BOZZATO, F.; PRETZSCH, H.; DE-MIGUEL, S.; PAQUETTE, A.; HERAULT, B.; SCHERER-LORENZEN, M.; BARRETT, C. B.; GLICK, H. B.; HENGEVELD, G. M.; NABUURS, G.-J.; PFAUTSCH, S.; VIANA, H.; VIBRANS, A. C.; AMMER, C.; SCHALL, P.; VERBYLA, D.; TCHEBAKOVA, N.; FISCHER, M.; WATSON, J. V.; CHEN, H. Y. H. H.; LEI, X.; SCHELHAAS, M.-J.; LU, H.; GIANELLE, D.; PARFENOVA, E. I.; SALAS, C.; LEE, E.; LEE, B.; KIM, H. S.; BRUELHEIDE, H.; COOMES, D. A.; PIOTTO, D.; SUNDERLAND, T.; SCHMID, B.; GOURLET-FLEURY, S.; SONKE, B.; TAVANI, R.; ZHU, J.; BRANDL, S.; VAYREDA, J.; KITAHARA, F.; SEARLE, E. B.; NELDNER, V. J.; NGUGI, M. R.; BARALOTO, C.; FRIZZERA, L.; BA AZY, R.; OLEKSYN, J.; ZAWI A-NIED WIECKI, T.; BOURIAUD, O.; BUSSOTTI, F.; FINER, L.; JAROSZEWICZ, B.; JUCKER, T.; VALLADARES, F.; JAGODZINSKI, A. M.; PERI, P. L.; GONMADJE, C.; MARTHY, W.; OBRIEN, T.; MARTIN, E. H.; MARSHALL, A. R.; ROVERO, F.; BITARIHO, R.; NIKLAUS, P. A.; ALVAREZ-LOAYZA, P.; CHAMUYA, N.; VALENCIA, R.; MORTIER, F.; WORTEL, V.; ENGONE-OBIANG, N. L.; FERREIRA, L. V.; ODEKE, D. E.; VASQUEZ, R. M.; LEWIS, S. L.; REICH, P. B. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science*, v. 354, n. 6309, p. aaf8957–aaf8957, 14 out. 2016.

- MALHI, Y.; DOUGHTY, C. E.; GALETTI, M.; SMITH, F. A.; SVENNING, J. C.; TERBORGH, J. W. **Megafauna and ecosystem function from the Pleistocene to the Anthropocene** *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* National Academy of Sciences, 26 jan. 2016.
- MARTINE, G.; ALVES, J. E. D. Economia, sociedade e meio ambiente no século 21: tripé ou trilema da sustentabilidade? **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 32, n. 3, p. 433–460, dez. 2015.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: Biodiversity Synthesis**. Washington, DC: World Resources Institute, 2005. 100 p.
- NORRIS, K.; TERRY, A.; HANSFORD, J. P.; TURVEY, S. T. Biodiversity Conservation and the Earth System: Mind the Gap. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 35, n. 10, p. 919–926, 1 out. 2020.
- OLIVER, T. H.; HEARD, M. S.; ISAAC, N. J. B.; ROY, D. B.; PROCTER, D.; EIGENBROD, F.; FRECKLETON, R.; HECTOR, A.; ORME, C. D. L.; PETCHEY, O. L.; PROENÇA, V.; RAFFAELLI, D.; SUTTLE, K. B.; MACE, G. M.; MARTÍN-LÓPEZ, B.; WOODCOCK, B. A.; BULLOCK, J. M. Biodiversity and Resilience of Ecosystem Functions. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 30, n. 11, p. 673–684, 1 nov. 2015.
- ORSATO, R. J.; DE CAMPOS, J. G. F.; BARAKAT, S. R.; NICOLLETTI, M.; MONZONI, M. Why join a carbon club? A study of the banks participating in the Brazilian “Business for Climate Platform”. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 387–396, jun. 2015.
- ORTIZ-BOBEA, A.; AULT, T. R.; CARRILLO, C. M.; CHAMBERS, R. G.; LOBELL, D. B. Anthropogenic climate change has slowed global agricultural productivity growth. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 4, p. 306–312, 1 abr. 2021.
- PIMM, S. L.; JENKINS, C. N.; ABELL, R.; BROOKS, T. M.; GITTLEMAN, J. L.; JOPPA, L. N.; RAVEN, P. H.; ROBERTS, C. M.; SEXTON, J. O. The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. **Science**, v. 344, n. 6187, p. 1246752–1246752, 30 maio 2014.
- REALE, R.; MAGRO, T. C.; RIBAS, L. C. Measurement and analyses of biodiversity conservation actions of corporations listed in the Brazilian stock exchange’s corporate sustainability index. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 14–24, jan. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617321212>>.
- REALE, R.; MAGRO, T. C.; RIBAS, L. C. Biodiversity conservation actions as a tool to improve the management of sustainable corporations and their needs ecosystem services. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 1–10, maio 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619304184>>.
- REALE, R.; RIBAS, L. C.; BORSATO, R.; MAGRO, T. C.; VOIGTLAENDER, M. The LIFE certification methodology as a diagnostic tool of the environmental management system of the automotive industry. **Environmental Science & Policy**, v. 57, p. 101–111, mar. 2016.
- SIEW, R. Y. J. A review of corporate sustainability reporting tools (SRTs). **Journal of Environmental Management**, v. 164, p. 180–195, 1 dez. 2015.
- SMITH, R. J.; BENNUN, L.; BROOKS, T. M.; BUTCHART, S. H.; CUTTELOD, A.; DI MARCO, M.; FERRIER, S.; FISHPOOL, L. D.; JOPPA, L.; JUFFE-BIGNOLI, D.; KNIGHT, A. T.; LAMOREUX, J. F.; LANGHAMMER, P.; POSSINGHAM, H. P.; RONDININI, C.; VISCONTI, P.; WATSON, J. E.; WOODLEY, S.; BOITANI, L.; BURGESS, N. D.; SILVA, N.; DUDLEY, N.; FIVAZ, F.; GAME, E. T.; GROVES, C.; LÖTTER, M.; MCGOWAN, J.; PLUMPTRE, A. J.; REBELO, A. G.; RODRIGUEZ, J. P.; SCARAMUZZA, C. A. de M. Synergies between the key biodiversity area and systematic conservation planning approaches. **Conservation Letters**, v. 12, n. 1, p. e12625, 17 dez. 2018.

TILMAN, D.; ISBELL, F.; COWLES, J. M. Biodiversity and Ecosystem Functioning. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 45, n. 1, p. 471–493, 23 nov. 2014. Disponível em: <<http://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917>>. Acesso em: 14 out. 2020.

TILMAN, D.; REICH, P. B.; ISBELL, F. Biodiversity impacts ecosystem productivity as much as resources, disturbance, or herbivory. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 26, p. 10394–10397, 26 jun. 2012.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. **Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development** (G. H. Brundtland) **United Nations**. [s.l.: s.n.].

Apêndice

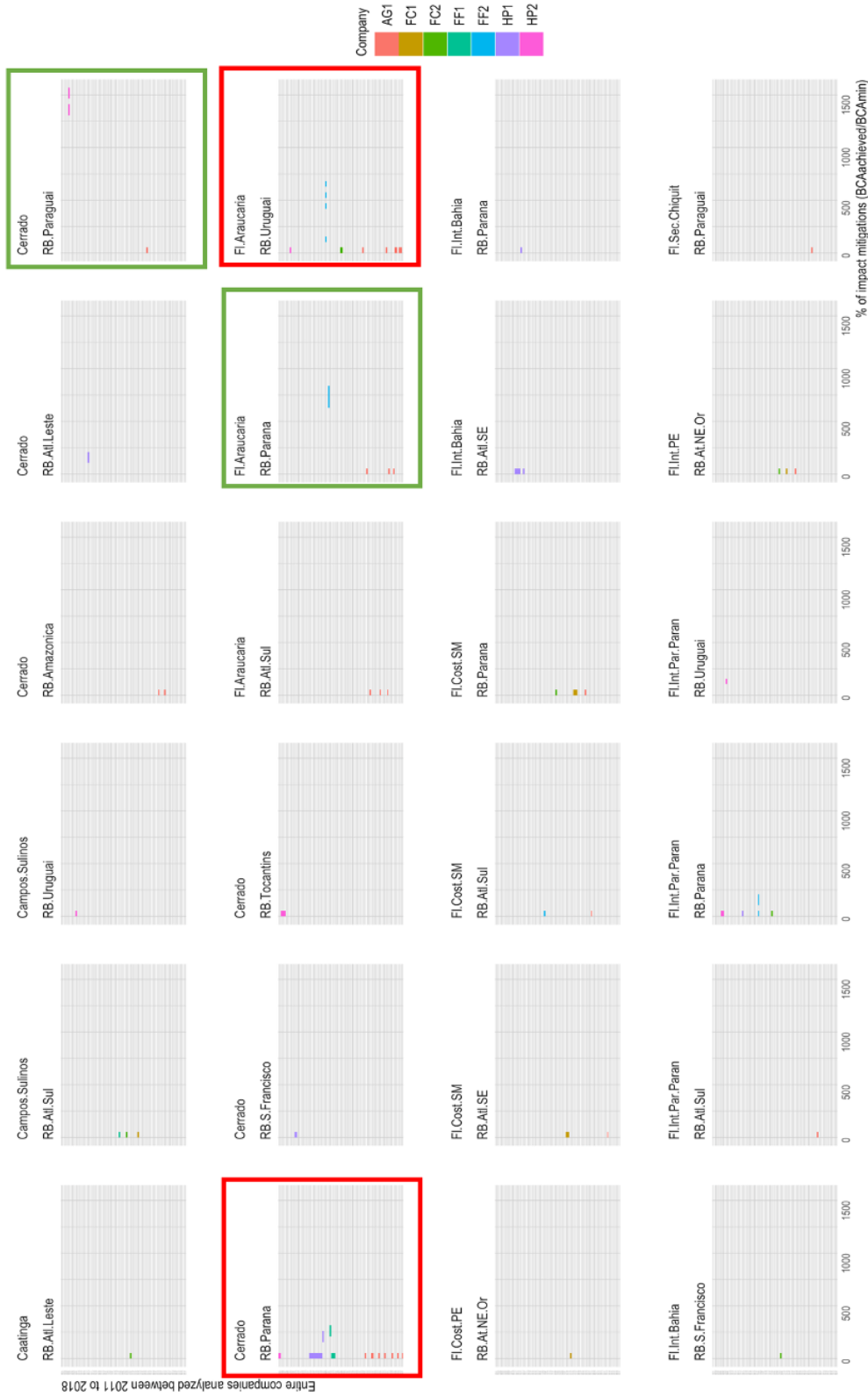


Figura Suplementar 7. Aqui, mostramos a distribuição das unidades produtivas para cada Ecorregião e Região Hidrográfica (RB) de todas as empresas analisadas neste estudo. Cada gráfico mostra o número total de unidades de produção (linha a linha) dentro de cada Ecorregião por Região Hidrográfica e suas respectivas mitigações alcançadas. Das 24 combinações analisadas, apenas duas vinham recebendo mitigações de todos os impactos ambientais negativos, enquanto as outras 22 combinações estão longe de mitigar seus impactos ambientais negativos, mesmo somando todos os $ACB_{realizado}$ para a região da combinação. O quadrado verde mostra as duas regiões de combinação em que todos os impactos ambientais negativos foram mitigados, e o quadrado vermelho mostra as duas regiões de combinação com mais unidades produtivas, mas não mitigaram seus impactos ambientais negativos, mesmo somando todos os $ACB_{realizado}$.

3 CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE COMO INDUTOR DO ARMAZENAMENTO TERRESTRE DE ÁGUA NA AMÉRICA DO SUL

Resumo

O equilíbrio do ciclo da água está intimamente relacionado com ambientes estáveis e vegetados. Logo, o avanço do desmatamento e da degradação dos ambientes naturais em regiões tropicais, compromete o ciclo hídrico em escalas regional e continental. Além disso, o aumento da exploração dos recursos naturais visando suprir as necessidades de consumo da população também exercem forte pressão para aumentar a crise da biodiversidade e as alterações climáticas. Todavia, apesar dos inúmeros avanços para a proteção e conservação dos sistemas ecológicos, os resultados das ações conservacionistas e de sustentabilidade desenvolvidas por diversos setores econômicos ainda é tímido e com poucos resultados que colaboram para provisionar mais serviços ecossistêmicos. Dessa forma, e considerando que todas as áreas de cobertura de vegetação nativa são importantes para o provisionamento de água terrestre, iniciamos o desenvolvimento de uma métrica para quantificar qual deveria ser o tamanho de uma área natural para suprir a demanda hídrica de empreendimentos e outras organizações. Para tanto, utilizamos dados de satélite GRACE, CHIRPS, ERA5 e análises de uso e cobertura do solo do projeto MapBiomias. Assim, investigamos os efeitos da cobertura de vegetação nativa para o armazenamento terrestre de água para a região tropical e subtropical da América do Sul, avaliando cerca de 75% do continente sul-americano. Investigamos as tendências de longo prazo para o armazenamento terrestre de água (TWS) e precipitação, comparados com a cobertura de vegetação nativa da América do Sul. Nossos resultados demonstram que extensas e conectadas superfícies de vegetação nativa possibilitam maior estabilidade hídrica nos ciclos das chuvas de curto e longo prazo. Além disso, descobrimos e quantificamos que, quanto maior a superfície de vegetação nativa em grandes regiões, maior é o armazenamento terrestre de água e maior é a estabilidade nas tendências, independente do bioma avaliado. Os diferentes usos e mudanças na cobertura da terra são os principais responsáveis na alteração das tendências lineares de armazenamento terrestre de água. Por fim, estimamos a água utilizada por algumas empresas e inferimos o tamanho das áreas naturais necessárias para atender a demanda hídrica e o quanto as áreas já criadas e mantidas por esses projetos colaboram para o armazenamento de água terrestre. A dimensão das áreas naturais criadas pelas empresas permite o armazenamento de água terrestre de apenas 18% a 27% do total de água necessário para sustentar o processo produtivo dessas empresas. Indicamos, portanto, a possibilidade de criação de consórcios empresariais para que, juntos, possam ampliar as ações de conservação e criar mais áreas de conservação para aumentar a disponibilidade de água e outros serviços ecossistêmicos.

Palavras-chaves: TWS; GRACE; Conservação da biodiversidade; Sustentabilidade; Serviços ecossistêmicos;

Biodiversity conservation as an inducer of terrestrial water storage in South America

Authors: Ricardo Reale ^{a, b, d}; Teresa Cristina Magro-Lindenkamp ^b; Imma Oliveras Menor ^{a, c}

a – Environmental Change Institute, School of Geography and the Environment, University of Oxford; Oxford, UK;

b – Department of Forest Sciences, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo, Piracicaba, São Paulo, Brazil

c – AMAP (Botanique et Modélisation de l'Architecture des Plantes et des Végétations), Université de Montpellier, CIRAD, CNRS, INRAE, IRD; Montpellier, France

d – Corresponding author: realericardo@gmail.com

Abstract

The balance of water cycle is closely related to stable and vegetated environments. Therefore, the advance of deforestation and degradation of natural environments in tropical regions compromises the water cycle at regional and continental scales. In addition, the increased exploitation of natural resources to meet the consumption needs of the population also exert strong pressure to increase the biodiversity crisis and climate change. However, despite the numerous advances for the protection and conservation of ecological systems, the results of conservation and sustainability actions developed by various economic sectors are still timid and with few results that collaborate to provide more ecosystem services. In this way, and considering that all areas covered by native vegetation are important for the provision of terrestrial water, we started the development of a metric to quantify the size of a natural area to supply the water demand of enterprises and other organizations. To this end, we used GRACE, CHIRPS, ERA5 satellites data and land use and land cover analyzes from the MapBiomias project. Thus, we investigated the effects of native vegetation cover on terrestrial water storage for the tropical and subtropical region of South America, evaluating about 75% of the South American continent. We investigated long-term trends for terrestrial water storage (TWS) and precipitation, compared to the native vegetation cover of South America. Our results demonstrate that extensive and connected surfaces of native vegetation allow greater water stability in short and long-term rainfall cycles. In addition, we found and quantified that the greater the surface of native vegetation in large regions, the greater the terrestrial water storage and the greater the stability in trends, regardless of the evaluated biome. Different uses and changes in land cover are primarily responsible for changing linear trends in terrestrial water storage. Finally, we estimated the water use by some companies and inferred the size of natural areas needed to meet the water demand, as well as how much the areas already created and maintained by these projects collaborate for the terrestrial storage of water. We found that with the areas created by the projects, only between 18% and 27% of the water resources consumed are being provided for by the natural areas of these projects. We therefore indicate the possibility of creating business consortia so that, together, they can expand conservation actions and create more conservation areas to increase the availability of water and other ecosystem services.

Keywords: Ecosystem services; Sustainability; Biodiversity conservation; LIFE certification; Environmental impacts;

3.1 Introdução

Talvez o primeiro relato de que as atividades humanas afetam o clima tenha sido documentado por Teofrasto (371-287 aC) na Grécia antiga. No entanto, somente a partir dos anos 1400 que as conexões entre chuvas e florestas começaram ser constantemente investigadas, sendo as últimas décadas muito ricas em discussões científicas ora favoráveis, ora desfavoráveis às teorias de que as florestas são benéficas às chuvas e ao clima (BENNETT; BARTON, 2018). Há também um grande debate se monoculturas florestais prejudicam os recursos hídricos, ou, se quando estabelecidas para recuperação de áreas degradadas possibilitam retorno de alguns serviços ambientais (FERRAZ; LIMA, 2022, pp. 221–222). Apesar do longo debate sobre esse tema, ainda não há consenso científico se as florestas melhoram ou pioram o equilíbrio hídrico. Todavia, as regiões tropicais e subtropicais apresentam inúmeras evidências das relações terra-atmosfera.

Salazar et al. (2015) apontam que a remoção da cobertura vegetal nativa dos diferentes biomas da América do Sul gera reduções significativas na precipitação e aumento da temperatura da superfície. Isto ocorre, pois, áreas suficientemente grandes de cobertura arbórea atraem ativamente ar e umidade de regiões com menos cobertura vegetal (MAKARIEVA *et al.*, 2013; SHEIL; BURSLEM, 2003), desde que estejam ligadas com a região costeira dos continentes (MAKARIEVA *et al.*, 2007). Ou seja, a diminuição ou degradação da cobertura arbórea impede a formação dos “rios aéreos” (ARRAUT *et al.*, 2012) ou “rios voadores” (NOBRE, 2014) e interrompe o funcionamento da bomba biótica (MAKARIEVA *et al.*, 2007).

Segundo a teoria da bomba biótica proposta por Makarieva et al. (2007), regiões com grande extensão de terra coberta por florestas e/ou outros tipos de vegetações, possibilitam a manutenção do percurso da umidade oceânica em direção ao interior do continente. Isso possibilita alta pluviosidade a milhares de quilômetros de distância da região costeira, como exemplo sendo citadas as bacias do rio Amazonas na América do Sul, bacia do rio Congo na África equatorial, e bacia do Yenisei na Ásia setentrional (SHEIL, 2018). Na Amazônia, por exemplo, a alta evapotranspiração da floresta diminui a pressão atmosférica sobre a região, criando o “Jato de Baixo Nível do Caribe” (*Caribbean Low Level Jets – LLJ*), o qual se opõe aos ventos alísios à medida que é atraído para o continente sul-americano (POVEDA; JARAMILLO; VALLEJO, 2014), carregando assim umidade oceânica a longas distâncias da costa. Por outro lado, regiões sem florestas recebem cada vez menos umidade oceânica conforme aumenta a distância da costa para o interior do continente, reduzindo à metade a precipitação para cada centena de quilômetros sobre terreno desprovido de vegetação (MAKARIEVA *et al.*, 2007, 2013; MAKARIEVA; GORSHKOV; LI, 2009; SHEIL; MURDIYARSO, 2009).

Ou seja, o equilíbrio do ciclo da água está intimamente relacionado com ambientes estáveis e vegetados. No entanto, processos de antropização como o desmatamento, por exemplo, comprometem o equilíbrio hídrico, pois a água das chuvas sai do sistema desmatado por escoamento superficial e subterrâneo com maior velocidade, diminuindo ou até cessando a reciclagem da água pela evapotranspiração (SPERA *et al.*, 2016). Com a degradação ou remoção total da vegetação, a bomba biótica como proposto por Makarieva et al. (2007), diminui ou acaba. Ou seja, essas complexas interações terra-atmosfera são responsáveis pelo

maior ou menor volume de precipitação em regiões, respectivamente, com maior ou menor cobertura vegetal (MOLINA *et al.*, 2019). Logo, o desmatamento em grande escala no Cerrado compromete o volume de água da chuva que pode atingir a Amazônia (MALHADO; PIRES; COSTA, 2010), a qual também sofre com extensivo desmatamento, aumentando as consequências negativas no ciclo hídrico de toda a América do Sul, como o prolongamento da estação seca em diversas regiões (COSTA; PIRES, 2010). Além disso, o desmatamento na Amazônia afeta negativamente o balanço hídrico da bacia do Prata, onde 70% de seus recursos hídricos dependem da evaporação da floresta amazônica (MARENGO *et al.*, 2018). Também, muitos modelos climatológicos indicam que devido ao desmatamento e às alterações climáticas, a Amazônia e o Nordeste do Brasil enfrentarão diminuição da precipitação, enquanto que a Bacia do Prata enfrentará aumento (ALVES *et al.*, 2021).

Um dos principais componentes do ciclo hidrológico é o armazenamento terrestre de água (*Terrestrial Water Storage – TWS*) (NI *et al.*, 2018), que é uma medida indicativa do total de água presente na área de interesse, considerando as águas superficiais, da zona radicular do solo, da acumulada como neve em regiões de altas latitudes, e água subterrânea. Portanto, a quantificação do TWS é de difícil execução. No entanto, em 2002 a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) lançou dois satélites gêmeos com equipamentos sensíveis ao campo gravitacional da Terra. Uma vez que o campo gravitacional da Terra está relacionado com a massa do planeta, qualquer oscilação de massa irá gerar variações e anomalias no campo gravitacional (TAPLEY *et al.*, 2004a, 2004b) e que podem ser percebidas pelos satélites gêmeos GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*). Logo, desde abril/2002, as oscilações da massa de água do ciclo hidrológico são percebidas pelos satélites da missão GRACE (RODELL *et al.*, 2007; RODELL; FAMIGLIETTI, 1999; SUN *et al.*, 2012; SWENSON; WAHR, 2006), com alta precisão para áreas superiores a 200.000km² (FRAPPART; RAMILLIEN; RONCHAIL, 2013; LONGUEVERGNE; SCANLON; WILSON, 2010).

A possibilidade de estimar o armazenamento terrestre de água (TWS) abriu precedentes para quantificações precisas dos serviços ecossistêmicos provisionados pela natureza e amplamente consumidos pelos diversos setores econômicos. Ou seja, os tomadores de decisão começam a ter acesso a ferramentas que possibilitam a criação de consórcios de grandes empresas e outras organizações para que suas práticas sustentáveis possam ser melhores dimensionadas a obterem resultados que sejam, de fato, benéficos aos ecossistemas. Reale *et al.* (2022, 2019, 2018, 2016) demonstram que parcelas dos setores empresariais almejam transformar seus processos produtivos mais eloquentes aos preceitos da sustentabilidade. No entanto, as ações desenvolvidas estão mais ligadas ao atendimento de requisitos de importantes e essenciais certificações ambientais que muito colaboram para a guinada sustentável da economia, porém, com baixo ou nenhum retorno para o reequilíbrio dos serviços ecossistêmicos (REALE; MAGRO; RIBAS, 2019; REALE; RIBAS; MAGRO LINDENKAMP, 2022). Na prática, apesar do aumento de empresas e governos desenvolvendo ações de cunho sustentável, tais ações não estão sendo suficientes para barrar as crises da biodiversidade, hídrica e o aquecimento global. Os empreendimentos deveriam implantar ações conservacionistas para a biodiversidade como um novo lastro do crescimento econômico empresarial, baseado no histórico de necessidade de serviços ecossistêmicos da empresa e focando além de reduções no

consumo de recursos naturais, na expansão de ações para a conservação da biodiversidade que contribuam para aumentar e acelerar a resiliência e resistência dos ecossistemas.

Neste contexto, Reale et al. (2022) apontam que a maneira pela qual a sustentabilidade tem sido interpretada deve ser aprimorada, inserindo as ações para a conservação da biodiversidade no centro de tomada de decisões. Ainda, os autores indicam a possibilidade dos empreendimentos e setores que mais consomem os recursos naturais poderem desenvolver ações conservacionistas que estimulem a provisão de serviços ecossistêmicos no futuro, de acordo com o consumo passado e baseado no crescimento econômico que as organizações tiveram. Assim, para o futuro, seria possível que as organizações projetem o quanto de ações para serviços ecossistêmicos deverão desenvolver para atingirem o crescimento econômico almejado, de acordo com os dados de consumo anteriores da empresa e considerando possíveis melhorias nos sistemas de produção. No entanto, é de grande carência ferramentas que apontem para os empreendimentos o que devem desenvolver em consonância com o que consomem da natureza.

Com os avanços das tecnologias remotas, como análise de TWS, as quantificações globais e regionais do ciclo da água foram facilitadas e tornaram-se de grande precisão. Além disso, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e Inteligência Artificial (IA) também permitem quantificar, em escala global, o uso e ocupação do solo e diversos dados climáticos. Assim, auxiliam no desenvolvimento de novas ferramentas para ações que devem ser rapidamente implementadas pelos setores econômicos visando a sustentabilidade e bem-estar da sociedade humana.

No entanto, três principais questões devem ser respondidas previamente antes de ferramentas que possam auxiliar na proteção e promoção de serviços ecossistêmicos (principalmente provisionamento de água) sejam elaboradas e implementadas: 1) Os diferentes usos e mudanças na cobertura da terra alteram as tendências de precipitação? 2) As tendências de precipitação implicam em mudanças de mesma direção das tendências de armazenamento de água terrestre? 3) Qual é a produção de estoque de água terrestre das áreas naturais? Para responder esses questionamentos, testamos a hipótese de que regiões com maior cobertura de vegetação nativa apresentariam maior estabilidade nas tendências históricas de precipitação e de armazenamento de água terrestre (TWS). Por outro lado, as áreas antropizadas apresentariam tendências de reduções no volume de precipitação e de TWS. Assim, o propósito desse trabalho foi iniciar a discussão de uma nova abordagem para prever quanto de áreas naturais, em média, contribuem para a disponibilidade hídrica em escala continental, auxiliando tomadores de decisão no reestabelecimento dos serviços ecossistêmicos de provisão que mais são utilizados e alterados pelas atividades humanas.

3.2 Metodologia

3.2.1 Área de estudo

Aproximadamente 75% da América do Sul (13.897.100 Km²) foram subdivididas em 45 regiões abrangendo os biomas Amazônia, Cerrado, Mata Atlântica, Caatinga, Pantanal, Pampa e Chaco (Figura 8). Essas áreas coincidem com a região de análises da iniciativa MapBiomias (MAPBIOMAS, 2019), que utiliza

imagens do satélite Landsat desde 1985 até o presente para produzir análises de séries temporais dos diversos usos e mudanças de cobertura do solo. Os dados podem ser acessados através do site do MapBiomias e também pelo Google Earth Engine.

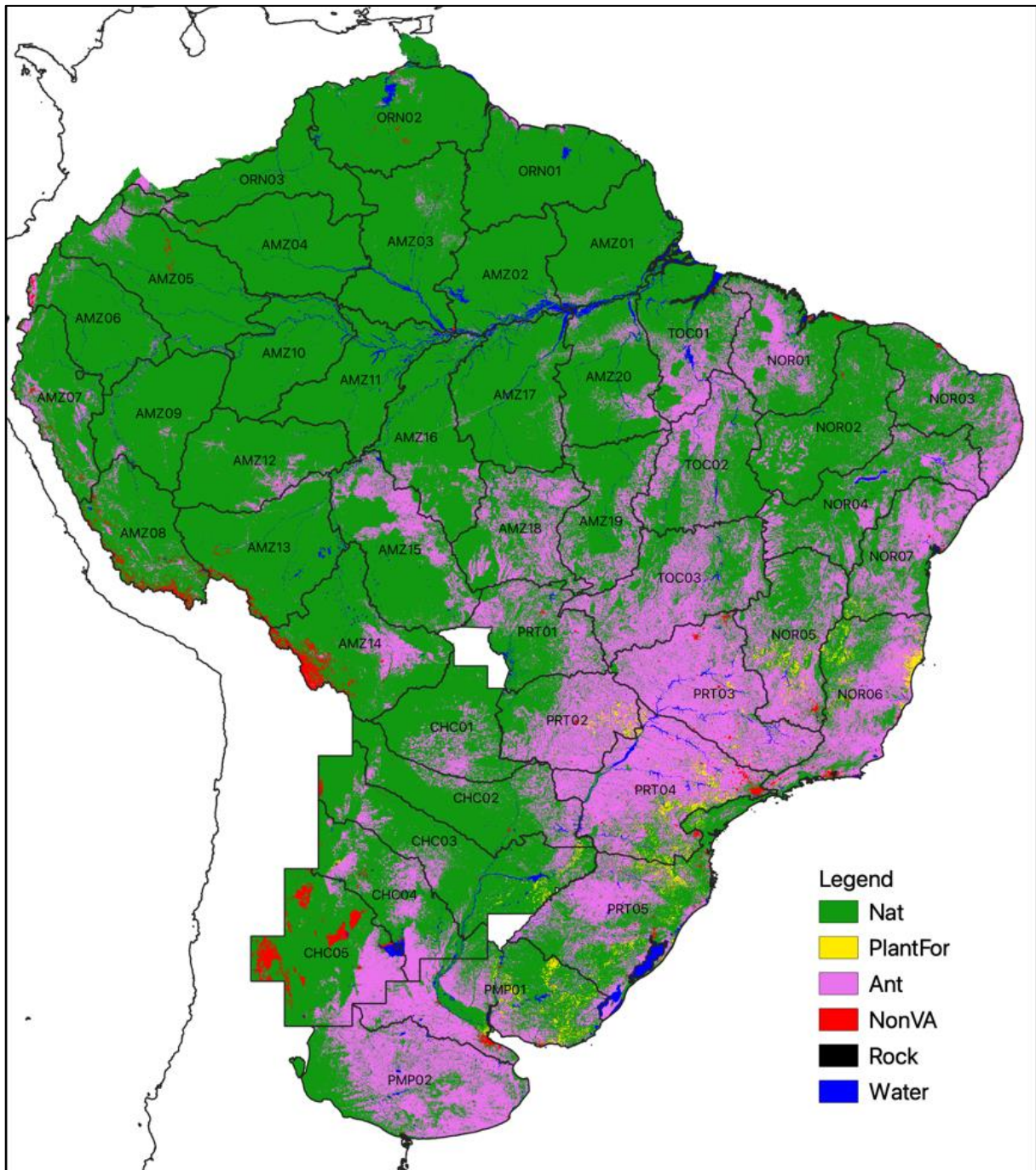


Figura 8. As 45 regiões avaliadas neste estudo. Em roxo são evidenciadas as áreas “antropizadas” e em verde são evidenciadas as áreas “nativas”. Em amarelo (PlantFor), destacamos as monoculturas de silvicultura. No entanto, no âmbito final do trabalho, essas áreas também foram adicionadas nas áreas antropizadas. A imagem exibe análise para o ano de 2018. Legenda: “Nat”: Nativa; “PlantFor”: Florestas plantadas; “Ant”: Antropizada; “NonVA”: Sem vegetação; “Rock”: rochas/solo exposto; “Water”: cursos e massas d’água.

A divisão das regiões foi baseada no banco de dados HydroBASINS do HydroSHEDS (*Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales*) (LEHNER; GRILL, 2013). Este banco de dados oferece, dentre inúmeras informações hidrológicas em escala local, regional e global, um conjunto de dados georreferenciados (vetor e raster) dos limites de bacias hidrográficas com resoluções que variam de 90 metros a 10 quilômetros no equador com até 12 níveis de divisões das bacias em nível hierárquico, seguindo o sistema de codificação Pfafstetter (LEHNER; GRILL, 2013). O nível 01 compreende todo o continente e os níveis seguintes aumentam a resolução espacial até atingir a menor resolução para micro bacias, no nível 12.

Utilizando o software QGIS e o Google Earth Engine, os shapefiles dos mapas de cobertura do MapBiomias foram sobrepostos pelos shapefiles de nível 03 do HydroBASINS para seleção e recorte das áreas. As regiões que possuem entre 200.000 Km² a 400.000 Km² tiveram seus limites preservados, enquanto que bacias que ultrapassaram 400.000 Km², ou que fossem menores do que 200.000Km², tiveram seus limites geográficos de bacias reagrupados com sub-bacias vizinhas. Para tanto, foram utilizados os níveis 02 a 06 do HydroBASINS para que todas as 45 regiões analisadas neste trabalho tivessem limites geográficos entre 200.000 Km² a 400.000 Km². A área de 200.000 Km² foi estipulada para maximizar a precisão de leitura dos dados do GRACE para leituras do TWS (*Terrestrial Water Storage*), conforme indicado por Rodell e Famiglietti (2001).

Por conveniência, foram atribuídos os seguintes nomes para as regiões de análise, seguido de siglas de três letras e um número sequencial até o limite de regiões daquela sigla, sendo: AMZ (Amazônia), ORN (Orinoco), TOC (Tocantins), PRT (La Prata), PMP (Pampa), CHC (Chaco) e NOR (Nordeste).

3.2.2 Coleta de dados

Os seguintes conjuntos de dados do Google Earth Engine foram utilizados para a coleta de dados: *Gravity Recovery and Climate Experiment* “GRACE Monthly Mass Grids – Land” (LANDERER; SWENSON, 2012; SWENSON, 2012; SWENSON; WAHR, 2006) para coletar o “Armazenamento Terrestre de Água” – do inglês “Terrestrial Water Storage” (TWS); “CHIRPS Daily: Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (version 2.0 final)” (FUNK *et al.*, 2015) para precipitação; “ERA5-Land monthly averaged data from 1981 to present” (MUÑOZ SABATER, 2019) para temperatura do ar acima de 2 metros da superfície. Também utilizamos as fontes de dados disponibilizados pelo projeto MapBiomias (MAPBIOMAS, 2019) para obter os dados referentes à cobertura vegetal dos períodos de 1985 até 2018 para os biomas Amazônia, Cerrado, Caatinga, Mata Atlântica, Pantanal brasileiro, Pampa brasileiro; e para o período de 2002 a 2018 para os biomas Chaco (Argentina, Bolívia e Paraguai) e Pampa (Uruguai e Argentina).

Além disso, foi usado o “GRACE-REC: uma reconstrução das mudanças no armazenamento de água causadas pelo clima no último século” desenvolvido por Humphrey e Gudmundsson (2019). Esta reconstrução dos dados do satélite GRACE será tratada neste trabalho pela sigla TWSrec. Todos os códigos

e dados de nossa análise são compartilhados neste [link](#). Ainda, a coleta de dados de precipitação, TWSrec e temperatura foram realizados para o período de Jan/1985 a Dez/2018. Já a coleta de dados do GRACE foi realizada para o período de Abr/2002 a Dez/2016.

3.2.3 Análise de dados

O campo gravitacional da Terra está relacionado com a massa do planeta, o que significa que qualquer oscilação de massa irá gerar variações e anomalias com o campo gravitacional (TAPLEY *et al.*, 2004a, 2004b). Assim, as oscilações temporais da massa de água do ciclo hidrológico geram variações do campo gravitacional da Terra, que a missão GRACE pode perceber desde abril/2002 (RODELL *et al.*, 2007; RODELL; FAMIGLIETTI, 1999; SUN *et al.*, 2012; SWENSON; WAHR, 2006). Dessa forma, para coletar informações sobre o armazenamento terrestre de água - “Terrestrial Water Storage” (TWS) das 45 regiões, usamos o conjunto de dados “NASA/GRACE/MASS_GRIDS/LAND” disponível no Google Earth Engine. Esse banco de dados possui resultados das três agências espaciais responsáveis pela missão GRACE: CSR (Universidade do Texas/Centre for Space Research), GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam) e JPL (NASA Jet Propulsion Laboratory). Além disso, conforme indicado pelos três centros, calculou-se a média dos três dados fornecidos e que foram multiplicados pelo fator de escala do conjunto de dados “NASA/GRACE/MASS_GRIDS/LAND_AUX_2014”. Como resultado dessa coleta, é obtido os desvios anormais da média de massa em termos da extensão vertical da água em centímetros de Abr/2002 a Dez/2016. Ou seja, menos (mais) massa, indica menos (mais) água. Este dado será tratado neste trabalho como GRACE para indicar o armazenamento terrestre de água (TWS) do GRACE.

Já os dados da reconstrução GRACE realizados por Humphrey e Gudmundsson (2019) será tratado neste trabalho por TWSrec. Este conjunto de dados fornece quatro tipos diferentes de arquivos que podem ser usados para desenvolver a análise TWSrec. Para este estudo, foi utilizado o arquivo “GRACE_REC_v03_JPL_ERA5_monthly_ensemble_mean_1979-01-15_2019-07-15”, que segundo Humphrey e Gudmundsson (2019) possuem melhores performances para áreas tropicais e subtropicais. Os arquivos estão em “.nc” e foram convertidos para “GeoTIFF” no software R. Depois, o GeoTIFF criado foi exportado para o Google Earth Engine para extração dos dados das anomalias do TWSrec em centímetros para as regiões de interesse do trabalho para os períodos de Jan/1985 a Dez/2018.

A unidade de medida padrão utilizada nesse trabalho para medições de precipitação e TWS está em milímetros por mês (mm/mês). Sendo assim, após as coletas, todos os dados referentes a TWS ou precipitação foram conferidos e, quando necessário, convertidos para milímetros/mês. Os dados de áreas são dados em quilômetros quadrados (Km²).

A partir dos dados obtidos do MapBiomias, as 45 regiões foram classificadas como “Antropizadas”, “Em mudança” e “Nativas” de acordo com o coeficiente de antropização (CA), calculado pela “área antropizada” do ano de interesse dividida pela “área de cobertura natural” do mesmo ano. Para CA>50%, a região foi classificada como “Antropizada”, o que indica que mais de 50% da área da região foi

antropizada de alguma forma (desmatamento, pastagens, agricultura, etc.). Para $10\% < CA < 50\%$, a região foi classificada como “Em mudança”; e, por fim, para $CA < 10\%$, a região foi classificada como “Nativa”, ou seja, menos do que 10% da área da região foi antropizada em algum grau, mantendo mais de 90% da área total com cobertura vegetal nativa. Isso significa que não estamos diferenciando as ecorregiões ou os biomas da área continental, pois estamos interessados em investigar a cobertura vegetal nativa do terreno como efeito protetor do armazenamento total de água terrestre.

3.2.4 Análise estatística

Utilizou-se o software “R Core Team” (versão 4.0.2 <https://www.r-project.org>) para aplicar abordagens estatísticas paramétricas e não paramétricas com nível de significância de 95% ($p < 0,05$). Todos os dados, códigos e testes estatísticos utilizados nesta Tese podem ser acessadas pelo [link](#).

O período amostral de interesse para a coleta dos dados GRACE é de abril/2002 a dezembro/2016, totalizando 177 meses. No entanto, desse total, 23 meses ao longo de todo o período não tiveram leituras devido a problemas técnicos ou de manutenção do GRACE. Sendo assim, preenchemos essas lacunas por interpolação linear aplicada entre os valores mais próximos de cada lacuna através da função “fillGap” (pacote “oce” do R). Na sequência, esses dados foram dessazonalizados através do pacote “stats” utilizando a função “decompose”. Do mesmo modo, os dados de temperatura obtidos pelo ERA5 e precipitação obtido pelo CHIRPS também foram dessazonalizados, o que possibilitou avaliar a variabilidade anual das variáveis de interesse sem efeitos sazonais para os quais os dados climáticos possuem ampla autocorrelação (OUMA *et al.*, 2015).

Posteriormente, as séries históricas dos dois períodos (1985-2018 e 2002-2016) de todas as variáveis coletadas das 45 regiões foram aplicadas no teste não paramétrico original de Mann-Kendall do pacote “modifiedmk” por meio da função “mkttest”. Essa função também realiza o cálculo do estimador de magnitude da inclinação de Sen (do inglês Sen’s slope – SL). Logo, foi possível investigar e classificar a ocorrência de tendência linear única para cada um dos dois períodos, sendo classificada como positiva (para $p < 0,05$ e resultado $SL > 0$), tendência linear negativa (para $p < 0,05$ e resultado $SL < 0$) ou a não ocorrência de uma tendência linear (quando $p > 0,05$).

Dessa forma, classificamos as tendências lineares da série histórica das 45 regiões analisadas como: “(+)_trend” para uma tendência linear positiva, “(-)_trend” para uma tendência linear negativa e “no_trend” quando não há tendência linear. Assim, 45 resultados de magnitudes de Sen para análise foram obtidos.

Na sequência, foi realizada a comparação estatística das magnitudes de Sen nos grupos de classificação de cobertura: “Antropizada”, “Em mudança”, e “Nativa”. Foi testada a hipótese nula de que a média (para dados normais) ou mediana (para dados não normais) das magnitudes das tendências entre os grupos não diferiam. Dessa forma, foi possível investigar qual a influência da cobertura vegetal para

magnitude das tendências de precipitação e de TWS. Para tanto, foi utilizado a função “ggbetweenstats” do pacote “ggstatsplot” do R para execução dos cálculos e confecção dos gráficos.

A lista de resultados da magnitude de cada dado climático das 45 regiões foi previamente testada para normalidade, usando o teste de Shapiro-Wilk da função “normality” do pacote “dlookr”. Os testes de normalidade foram realizados de acordo com os grupos de regiões para tendências e, depois, para grupos de classificação de cobertura. Em ambos os casos, para grupos normais ($p > 0,05$), aplicou-se testes paramétricos. Para grupos testados com variáveis não normais, aplicou-se testes não-paramétricos. Ainda, foram testados a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene, usando a função “leveTest” do pacote “car”. No teste de Levene, o $p < 0,05$ indica que os grupos testados possuem variâncias diferentes e, portanto, aplicou-se ANOVA de Welch com correção post hoc de Bonferroni, seguido de análise pareada do teste de Games-Howell. Já para $p > 0,05$, que indica que as variâncias entre os grupos não diferem, foi aplicado ANOVA de Fisher com correção post hoc de Bonferroni, seguido de análise pareada do teste T de Student. Para as variáveis climáticas não normais, foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis com correção post hoc de Bonferroni. O teste de Dunn foi aplicado somente quando ocorreu rejeição da hipótese nula do teste de Kruskal-Wallis, ou seja, quando as medianas testadas apresentaram diferenças. Os resultados dos testes são apresentados no arquivo “.csv” disponibilizado no [link](#).

Também foram testadas as correlações entre as variáveis de interesse pela área de cobertura de vegetação nativa das regiões, através da função “ggscatterstats” do pacote “ggstatsplot”. A correlação é testada via fator de Bayes, apresentado a seguir nos resultados.

Na sequência, realizou-se análises de regressão linear função $y \sim x$ das magnitudes de Sen das tendências obtidas via Mann-Kendall do TWS e precipitação (mm/mês) pela área de cobertura da vegetação nativa total. A regressão linear possibilitou analisar a influência da cobertura de vegetação para o armazenamento de água terrestre (TWS). É esperado que o r^2 da regressão linear seja pequeno, uma vez que o modelo simplifica a dependência das tendências de TWS a apenas à cobertura de vegetação nativa como resposta preditora. Por fim, obteve-se a fórmula de regressão pela qual sugere-se qual a área de cobertura de vegetação nativa seria necessária para obter as tendências para TWS (mm/década). Os resíduos da regressão apresentam a qualidade do modelo proposto e estão disponíveis na Figura Suplementar 14.

Por fim, as estimativas aqui obtidas foram utilizadas para estimar o armazenamento terrestre de água de áreas com cobertura de vegetação nativa criadas ou mantidas por empresas analisadas por Reale et al. (2022).

3.3 Resultados e Discussão

A Figura 9 apresenta o mapa com os resultados das tendências lineares obtidas pelo Mann-Kendall seguido do estimador de magnitude de Sen para precipitação, temperatura do ar a dois metros da superfície, TWSrec e GRACE. Nos mapas a seguir (Figura 9-B a Figura 9-H) estão as representações das tendências para os dados coletados para os períodos 1985-2018 e 2002-2016, onde a cor azul claro representa as regiões

onde ocorreu aumento de tendência ((+)_trend); a cor vermelho representa as regiões onde ocorreu diminuição da tendência ((-)_trend); e a cor cinza claro representa as regiões que não apresentaram tendências (no_trend).

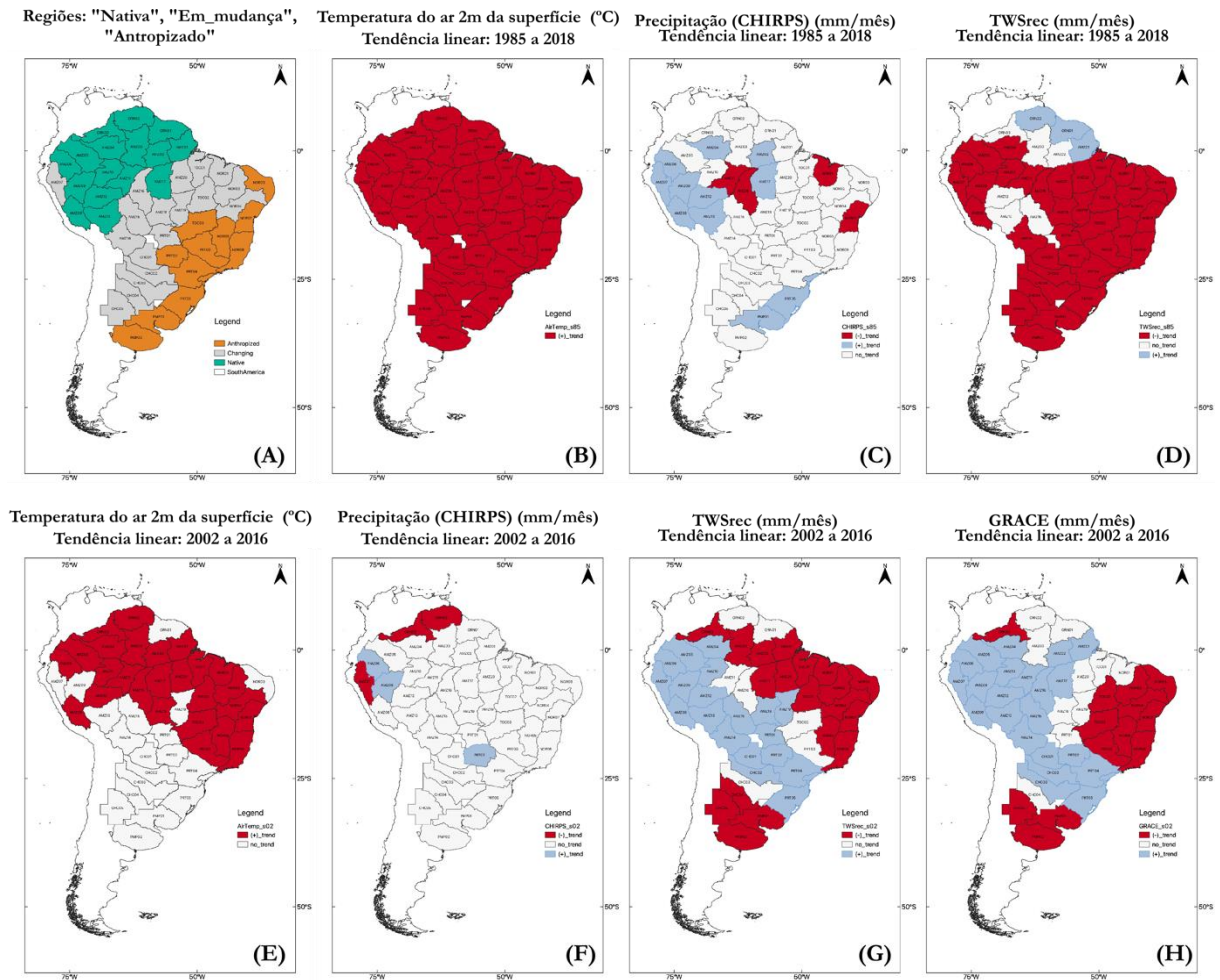


Figura 9. (A): Em verde claro, regiões “Nativas”; cinza escuro, regiões “Em mudança”; em laranja, regiões “Antropizado”. (B-H): Em vermelho: (-)_trend; em cinza claro: no_trend; em azul: (+)_trend

Ni et al. (2018) demonstram que a precipitação é o principal componente de mudanças do TWS. Além disso, a precipitação também é considerada um dos principais preditores de umidade do solo (WANG-ERLANDSSON *et al.*, 2022). Portanto, era esperado que as inclinações das tendências de TWS fossem semelhantes aos da precipitação. No entanto, como evidenciado na “Figura 9-C” e “Figura 9-F”, a maioria das regiões não apresentaram tendências lineares de precipitação (no_trend), enquanto que as análises de TWS (2002-2016) indicaram tendências positivas ou negativas na maioria das regiões (Figura 9-D, Figura 9-G, Figura 9-H). Ou seja, em análise de larga escala, ocorre divergência de valores e inclinações das tendências de precipitação e armazenamento terrestre de água (TWS).

Ainda, é possível observar na Figura 9-B que todas as regiões apresentaram aquecimento para o período de 1985 a 2018 (em vermelho: (+)_trend). Já para o período de 2002 a 2016 (Figura 9-E), apenas as

regiões mais ao norte, compreendendo Amazônia, Cerrado (centro e norte), norte da Mata Atlântica e Caatinga apresentaram aquecimento. Por outro lado, no período de 2002 a 2016, as regiões mais ao sul, compreendendo sul do Cerrado, sul da Mata Atlântica, Pantanal, Pampas e Chaco não apresentaram tendências estatisticamente significativas para temperatura. Isto sugere que o norte do Cerrado e o bioma completo da Caatinga estão aquecendo para os dois períodos avaliados (Figura 9-B, Figura 9-E) e também secando (Figura 9-C e Figura 9-F indicam não tendência para precipitação), mas os quadrantes Figura 9-D, Figura 9-G e Figura 9-H indicam tendências negativas para curto e longo prazo para TWS. Ou seja, apesar de aparentemente não terem sofrido diminuição nas tendências de chuvas, está ocorrendo diminuição do armazenamento terrestre de água, muito provavelmente ligados ao aquecimento e ao acelerado desmatamento dessas regiões.

As tendências de precipitação para o período de 1985 a 2018 (Figura 9-C) apresentam 30 regiões (66%) sem tendências (cinza claro: no_trend). Já para o período de 2002 a 2016 (Figura 9-F), 39 regiões (86%) não apresentaram tendências (cinza claro: no_trend). No entanto, as tendências de armazenamento terrestre de água, tanto para TWSrec (Figura 9-D e Figura 9-G) quanto para GRACE (Figura 9-H) indicam tendências opostas das obtidas para precipitação nos dois períodos em basicamente todas as regiões. Ou seja, as tendências de precipitação e TWS não acompanham as mesmas direções, sugerindo que outros fatores devem ser considerados para avaliação do TWS, como as mudanças de cobertura de solo.

Sendo assim, uma abordagem estatística de comparação entre as tendências de precipitação e os grupos de regiões com as mesmas tendências de TWS foram realizadas. Evidenciou-se que os grupos de regiões com mesmas tendências de TWS não diferiram quanto à variação das tendências de precipitação (Figura 10). Ou seja, não necessariamente em regiões que está tendo diminuição (aumento) do TWS é porque está ocorrendo diminuição (aumento) de precipitação. O mesmo ocorre para regiões sem tendência linear aparente. Os resultados referentes ao TWSrec foram avaliados e discutidos com cautela, visto que Humphrey e Gudmundsson (2019) utilizaram variáveis de precipitação do ERA5 para calibração e desenvolvimento da reconstrução, o que apresenta algumas divergências com os dados do CHIRPS. Dessa forma, é esperado que algumas divergências entre TWSrec e GRACE ocorram. Apesar do CHIRPS ser mais preciso, Humphrey e Gudmundsson (2019) utilizaram ERA5 devido à maior cobertura planetária do que CHIRPS.

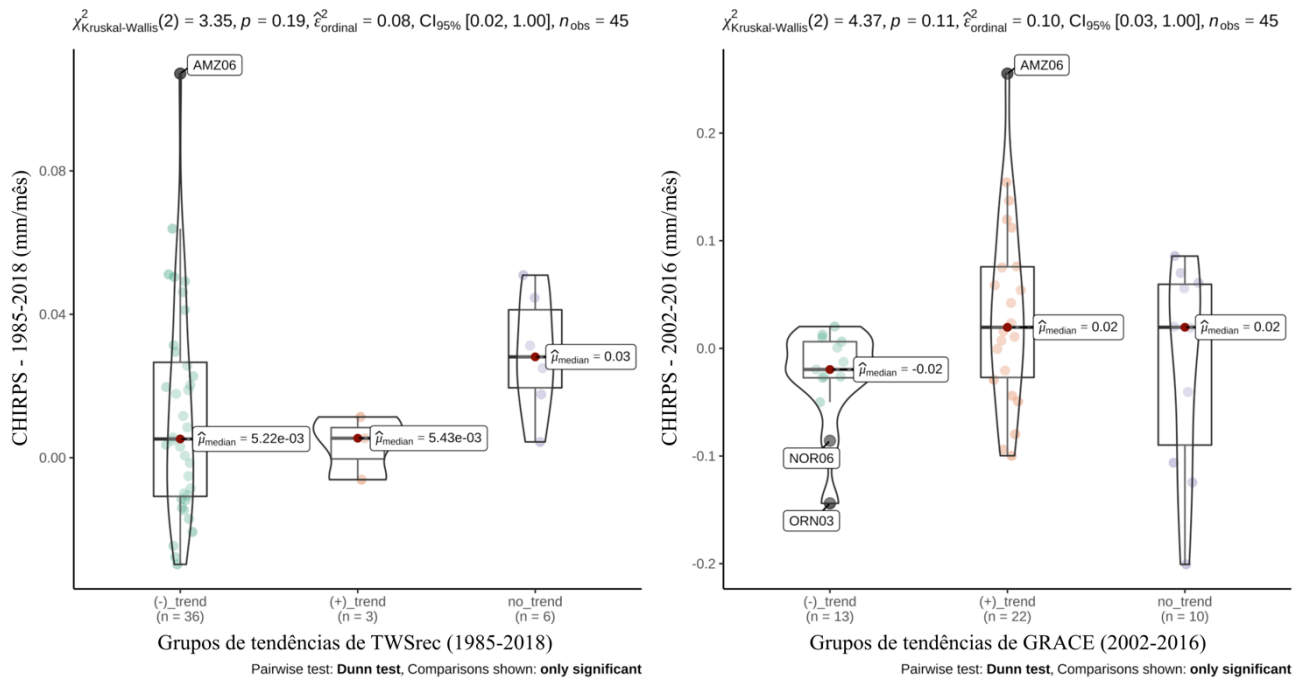


Figura 10. Comparativo entre tendência de precipitação e grupos de tendências de TWS. Não existem diferenças estatisticamente significativas entre as variâncias das tendências dos grupos.

Os resultados evidenciados na Figura 10 indicam que as tendências de precipitação não influenciaram nas tendências do TWS em ambos os períodos. Ou seja, apesar da precipitação ter importante papel para armazenamento terrestre de água, as tendências de precipitação não indicam a mesma tendência para TWS nas diferentes regiões quando agrupadas por semelhanças na direção da tendência ((-)_trend, no_trend, (+)_trend).

Segundo Levia et al. (2020) a alta biodiversidade contribui para que os solos sejam mais resilientes às secas, uma vez que possuem sistemas de enraizamento mais diversificados e isso otimiza o uso da água e de nutrientes pelas plantas, evitando lixiviações, erosões e outros problemas do excesso e acúmulo de água repentino no solo. Além disso, esses autores apresentam que o dossel mais homogêneo de regiões antropizadas, como os das monoculturas agrárias e/ou florestais, pode estar acelerando o ciclo da água. Por outro lado, Levia et al. (2020) ainda apontam que o dossel heterogêneo de regiões tropicais mantém a velocidade do ciclo hidrológico constante e em equilíbrio devido à maior rugosidade do dossel heterogêneo e dos sistemas radiculares complexos de sistemas com elevada biodiversidade.

Então, testamos a hipótese de que não existem diferenças de tendências lineares de precipitação entre os grupos de regiões com diferentes coberturas (“Nativa”, “Em mudança”, e “Antropizada”). A Figura 11 apresenta os gráficos com os resultados. Não encontramos diferenças estatisticamente significativas para as tendências de precipitação entre os grupos de regiões (Figura 11-A e Figura 11-C). Ou seja, a variabilidade das tendências de precipitação não difere entre os grupos avaliados (“Nativa”, “Em mudança”, e “Antropizada”), uma vez que as análises foram realizadas considerando o período total e desconsiderando

a sazonalidade. No entanto, as regiões “Nativas” e “Em mudança” no período 2002-2016 (Figura 11-B) e “Nativas” no período 1985-2018 (Figura 11-D), acumulam mais água terrestre do que as outras regiões, mesmo não tendo diferenças nas tendências de precipitação. De acordo com a análise, regiões com maior cobertura de vegetação nativa possuem no curto e longo prazo maior estabilidade no armazenamento terrestre de água.

Magnitude da inclinação de Sen para tendências de precipitação (esquerda) e TWS (direita)

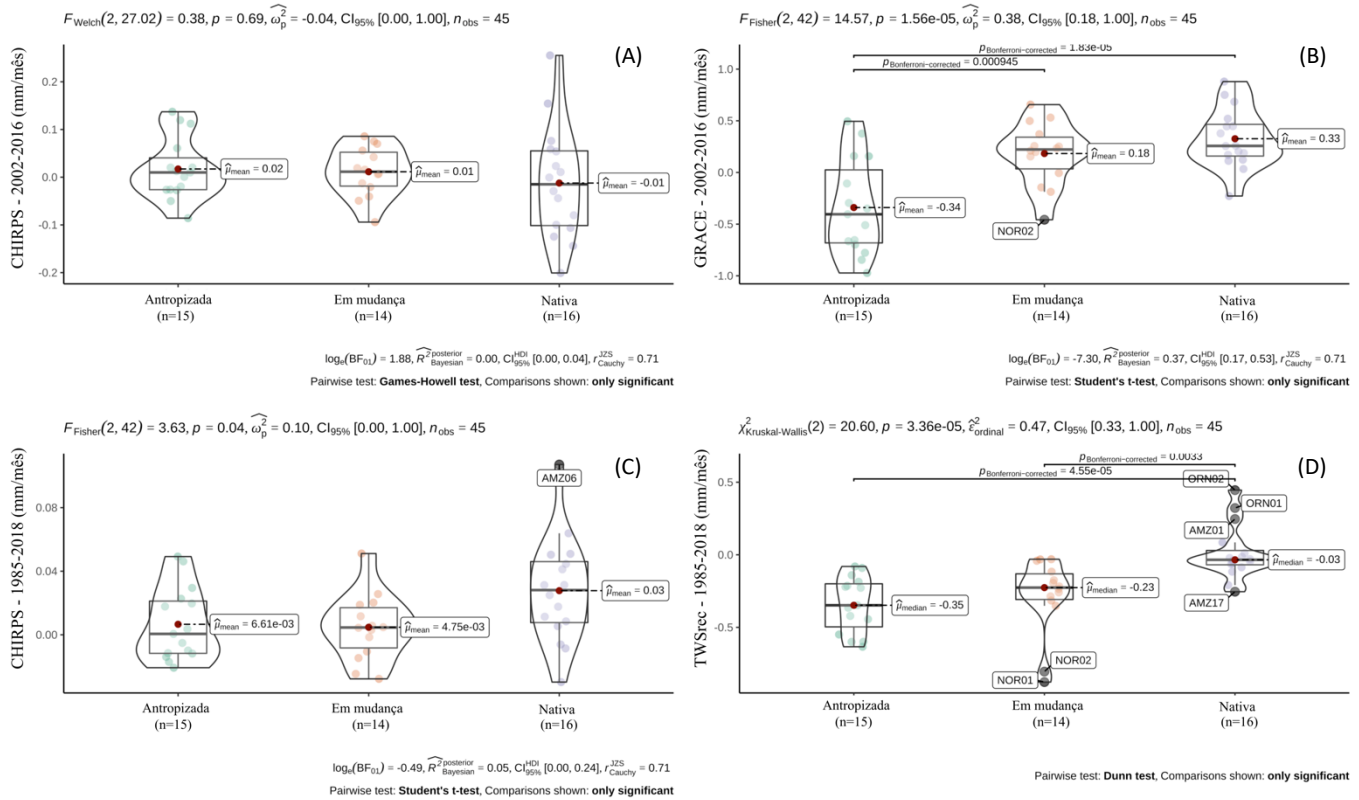


Figura 11. Comparação entre a magnitude das inclinações das tendências de precipitação (à esquerda) e do armazenamento terrestre de água (à direita).

Também foi avaliado o tamanho do efeito para ANOVA, evidenciado na Figura 11-B pelo ômega parcial ao quadrado igual a 0,38 ($\hat{\omega}_p^2=0,38$) com intervalo de confiança de 95% para GRACE, e na Figura 11-D, onde o épsilon ordinal ao quadrado é de 0,47 ($\hat{\epsilon}_{ordinal}^2=0,47$) para TWSrec. Em ambos os casos, os efeitos (0,38 e 0,47) indicam que a diferença entre os grupos é grande, segundo Field (2013). Ou seja, a maior cobertura de vegetação nativa influencia positivamente nas tendências de TWS. Ademais, seguindo Cohen (1992), o coeficiente de determinação do tamanho do efeito bayesiano r^2 com intervalos de densidade 95% é substancial para $r^2=0,37$ (37%), enquanto que valores muito próximos de zero são fracos ou insignificantes. Por fim, também foi investigado as diferenças segundo o fator de Bayes, comparando as probabilidades de ocorrência das hipóteses nula (não existe diferença) e alternativa (existe diferença). Foi utilizada a notação BF_{01} (do inglês: Bayes Factor) da probabilidade de ocorrência da hipótese nula (H_0)

contra a probabilidade de ocorrência da hipótese alternativa (H1). Desse modo, $\log_e (BF_{01}) = -7,30$ é igual $\log_e (BF_{10}) = +7,30$. Ou seja, a hipótese alternativa possui 1.480 chances de ocorrer contra a hipótese nula, sendo considerada evidência extrema e decisiva segundo Jeffreys (1961). Isso significa que as áreas de cobertura de vegetação nativa afetam a inclinação das tendências de armazenamento terrestre de água.

Nossos resultados sugerem que as regiões “Antropizadas” e “Em mudança” estão tendo seus ciclos hídricos acelerados, uma vez que, mesmo apresentando muitas regiões sem tendências lineares para precipitação (Figura 9-C e Figura 9-F), essas regiões estão em processo de diminuição do TWS. Ou seja, estão perdendo água devido provavelmente ao escoamento superficial e subterrâneo em resposta à retirada de vegetação nativa e conversão para pastagens e plantações de monocultura, o que gera aumento da temperatura (Figura 9-B e Figura 9-E) e também maior saída de água por evaporação. Como apontado por Levia et al. (2020), coberturas de solo com maior porcentagem de área utilizada para a agricultura, tornam o dossel homogêneo e com sistemas de enraizamento pobres, enquanto que as regiões “Nativas” mantêm o padrão de dossel heterogêneo devido à alta diversidade de espécies, o que mantém a velocidade do ciclo hídrico constante.

A água da precipitação que chega nas regiões “Antropizadas” e “Em mudança”, principalmente dentro do bioma Cerrado, podem estar sendo exportadas para as regiões “Nativas” com maior velocidade através do escoamento superficial e subterrâneo devido à menor concentração de vegetação e raízes nessas regiões, o que pode estar colaborando para aumentar a ocorrência e gravidade dos eventos extremos, como as secas prolongadas nas regiões de saída da água devido à baixa cobertura de vegetação. Ou seja, além dos efeitos negativos do aquecimento global a que todas as regiões analisadas estão sofrendo (Figura 9-B e Figura 9-E), nossos resultados sugerem que a velocidade do ciclo hidrológico sofre menores alterações em regiões com maiores coberturas de vegetação “Nativa”, como também já apontado por O'Connor et al. (2021).

Logo, o avanço da degradação no bioma Cerrado é prejudicial para todo o ciclo hidrológico da América do Sul, uma vez que além de comprometer os fluxos dos principais rios do Brasil (cerca de 80% das bacias hidrográficas brasileiras tem alguma ligação com o Cerrado (OLIVEIRA *et al.*, 2014), também compromete os aquíferos, como por exemplo o Guarani, que possui aproximadamente metade dos afloramentos dentro bioma Cerrado (WENDLAND; BARRETO; GOMES, 2007). No entanto, aquíferos protegidos por vasta cobertura de vegetação “Nativa”, como Alter do Chão na Amazônia, estão menos propensos às pressões climáticas, mas não imunes aos extremos climáticos, como já mostrado por Frappart et al. (2019), que indicaram que a seca de 2005 gerou forte anomalia no aquífero Alter do Chão.

Então, para investigar a correlação da cobertura de vegetação nativa com a tendência de precipitação e tendência de TWS, aplicamos o teste de Pearson, como demonstrado na Figura 12 para os períodos de 1985-2018 e 2002-2016.

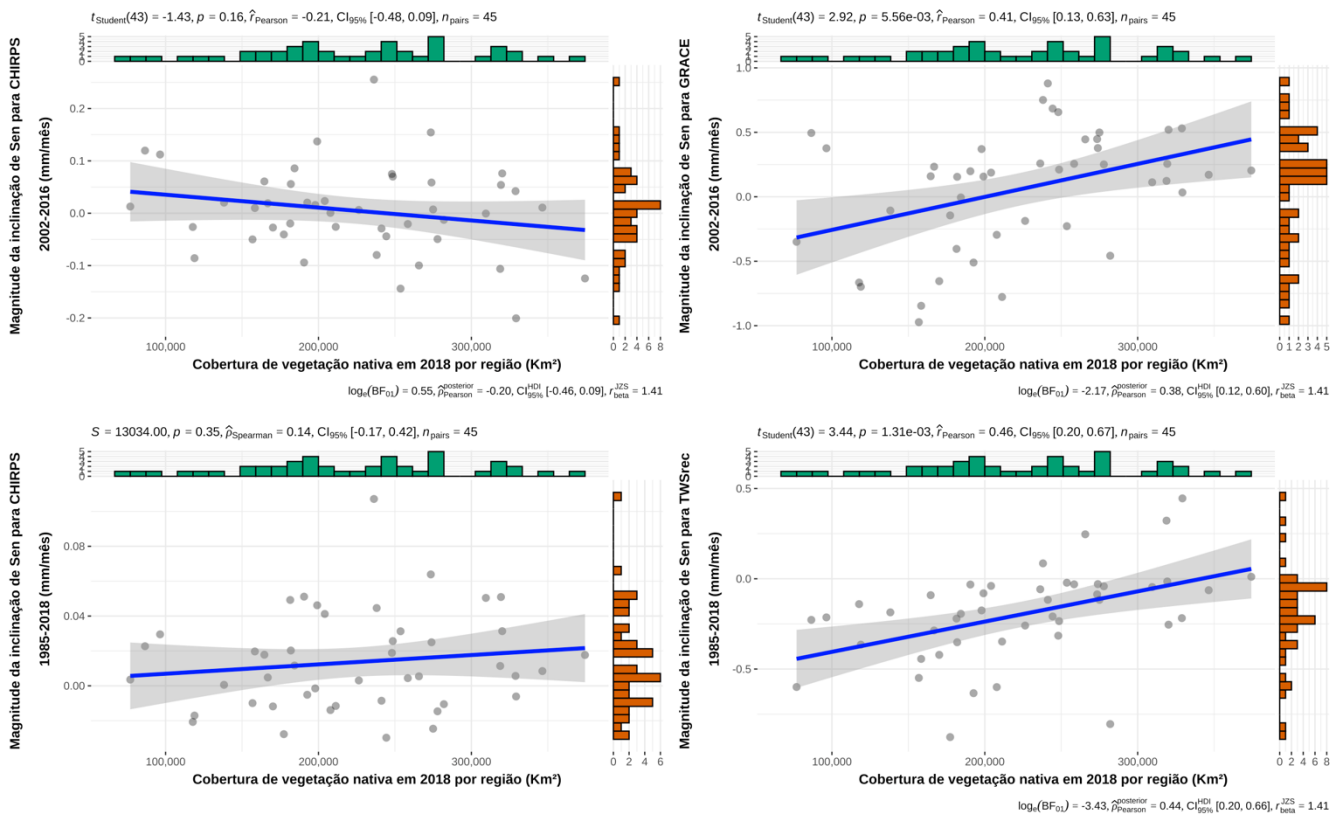


Figura 12. Teste de correlação de Pearson

O teste de correlação de Pearson revelou forte correlação positiva estatisticamente significativa entre a área de cobertura de vegetação nativa e as tendências de TWS. Além disso, o fator de Bayes indicou evidência extrema a favor da hipótese alternativa, segundo Jeffreys (1961), ou seja, confirma correlação entre a área de cobertura de vegetação nativa e as tendências de TWS. No entanto, para a correlação entre tendências de precipitação e área de cobertura de vegetação nativa, os resultados sugerem moderada correlação positiva não estatisticamente significativo para o período de 1985-2018, e correlação negativa estatisticamente não significativo para o período de 2002-2016.

Realizou-se uma análise de regressão linear da precipitação, armazenamento de água terrestre e também para área de cobertura vegetal nativa (Figura 13). Constatamos que quanto maior a área coberta por vegetação nativa, maior o armazenamento terrestre de água. No entanto, o modelo para precipitação não apresentou boa predição, pois as análises foram baseadas em longos períodos sem observar a sazonalidade, mais frequentes para modelagem de precipitação. O gráfico dos resíduos dos modelos é apresentado no material complementar (Figura Suplementar 14). Portanto, o incentivo e a proteção de grandes extensões de áreas naturais contíguas é uma importante ferramenta para a manutenção do clima planetário e armazenamento terrestre de água.

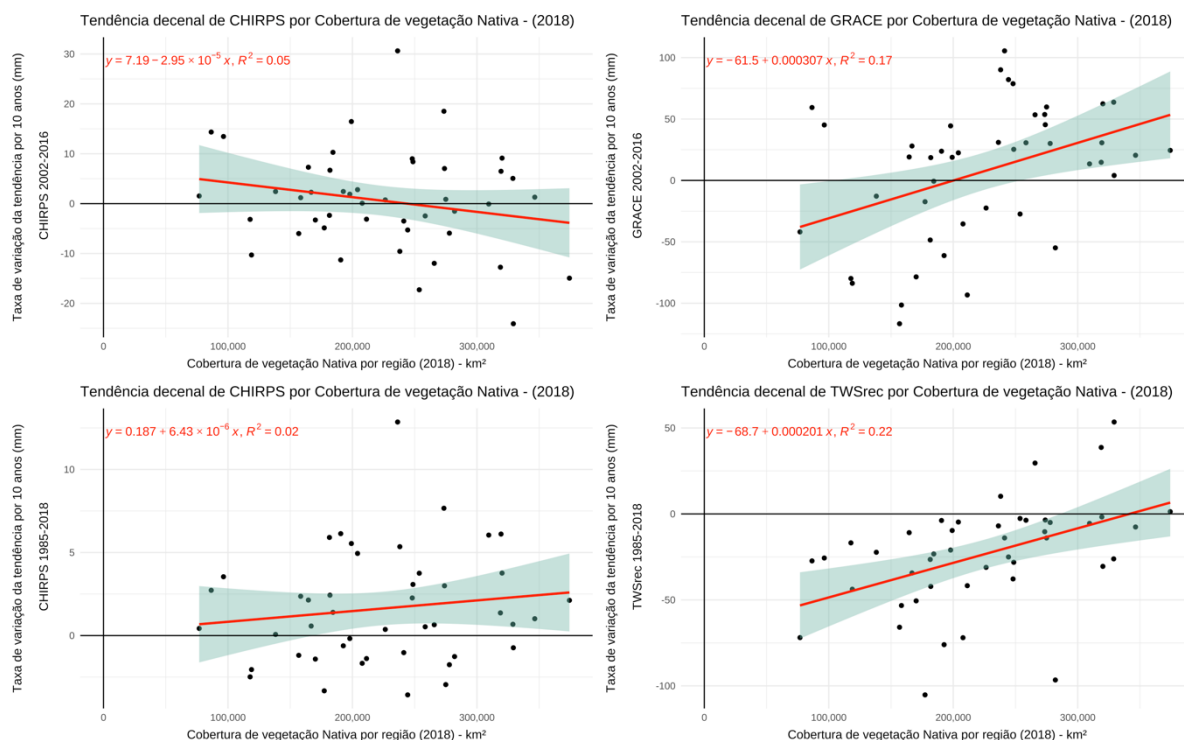


Figura 13. Modelo de regressão linear da tendência de dez anos da inclinação de Sen pela área de cobertura de vegetação nativa.

Segundo a NASA-JPL (2021), a anomalia de 1 mm na leitura do TWS equivale a 1.000 m³ de água por Km² de solo (ou 10⁻⁶ Km³/Km²). Sendo assim, cada 1 Km² de cobertura vegetal nativa nas diferentes regiões (Figura 13) contribui para o armazenamento terrestre de água entre 0,201x10⁻³ Km³ a 0,307x10⁻³ Km³ ao longo de dez anos (a magnitude da inclinação de Sen foi multiplicada por 10 anos (120 meses) na Figura 13). Para entender o significado disso, usamos aqui dados obtidos por Reale et al. (2022), – referente ao capítulo número 02 desta Tese – que apresenta a avaliação de cinco grandes corporações listadas no Índice de Sustentabilidade Empresarial (ISE) da bolsa de valores brasileira (B3) e que possuem 85 unidades industriais produtivas espalhadas por todo o território brasileiro. Essas empresas, juntas, consumiram um total de 1,18 Km³ de água no período de 2011 a 2018. Ou seja, considerando o mesmo modelo de produção e consumo de recursos hídricos, ao longo de 10 anos, essas corporações consumiram, juntas, cerca de 1,48 Km³ de água. Portanto, para suprir a demanda hídrica dessas 85 unidades produtivas espalhadas pelo território brasileiro ao longo de 10 anos, desconsiderando o índice de retorno de água à natureza ao longo do processo produtivo e o índice de melhoria da eficiência hídrica dessas corporações, seria necessária uma área coberta por vegetação nativa entre 4.810 Km² a 7.347 Km². No entanto, de acordo com Reale et al. (2022), as cinco corporações avaliadas criaram e protegem, juntas, apenas cerca de 1.316Km² de áreas naturais. Ou seja, contribuem com apenas entre 0,265 Km³ a 0,404 Km³ para armazenamento terrestre de água, o que representa entre, aproximadamente, 18% e 27% do total de água consumida ao longo de uma década por todos os empreendimentos avaliados.

No entanto, este modelo é apenas uma representação teórica da equivalência do tamanho de áreas naturais cobertas por vegetação nativa que seria necessário para suprir a demanda hídrica de um grupo de

empresas. Um cálculo mais aprofundado deve levar em consideração as características de cada região onde as unidades de negócios estão instaladas, bem como os valores obtidos via TWSrec e GRACE, além de avaliar as taxas de retorno de água para a natureza de cada empreendimento. Isso permitiria uma análise mais completa que indicaria com maior precisão quanta área natural seria necessária para suprir a demanda hídrica de cada empresa. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para cada corporação avaliada por Reale et al. (2022), desconsiderando as análises por unidade produtiva.

Tabela 4. Análise comparativa do consumo de água de cinco grandes corporações e o quanto é repostado na natureza através das áreas protegidas (AP) criadas por esses empreendimentos.

Empresas	Consumo de água (km ³)	Criação de AP (km ²)	TWS nas AP (km ³)	Reposição nas AP (TWSrec)	GRACE nas AP (km ³)	Reposição nas AP (GRACE)	AP para reposição de TWS (km ²) segundo TWSrec	AP para reposição de TWS (km ²) segundo GRACE
AG1	0,6168	0	0	0	0	0	3.069	2.009
FF1/FC1	0,0523	91	0,0183	34,94%	0,0279	53,36%	260	170
FF2/FC2	0,7411	1.168	0,2348	31,68%	0,3587	48,39%	3.687	2.414
HP1	0,0099	45	0,0091	91,64%	0,0138	139,97%	49	32
HP2	0,0566	12	0,0024	4,33%	0,0037	6,61%	281	184
Total	1,4767	1.316	0,2646	* 17,92%	0,4041	* 27,37%	7.347	4.810

* Referente à reposição total de TWS gerado pelo total de AP criada por todas as empresas. Não se refere à somatória das porcentagens de cada empresa.

Assim, e com base nos achados de Reale et al. (2022), nenhuma das empresas avaliadas criou áreas protegidas que permitissem a reposição total da água utilizada em seus processos industriais. A variação do percentual de reposição indicada na Tabela 4 deve-se aos diferentes períodos amostrados (2002-2016 para GRACE e 1985-2018 para TWSrec). Além disso, os resultados teóricos indicam a extensão total de áreas protegidas cobertas por vegetação nativa que as empresas teriam que criar para, ao longo de 10 anos, consumir água necessária a seus processos produtivos de forma sustentável.

Ressalta-se que esta análise tem caráter experimental para um modelo de consórcio no qual os setores empresariais poderiam colaborar com a preservação dos recursos naturais de forma mais direta e proporcional à sua produtividade industrial e desempenho econômico.

Por fim, fica evidente que as corporações podem usar metas econômicas históricas, bem como previsões futuras, para indicar quanta água deverá ser consumida para atingir os novos objetivos de crescimento econômico e iniciar, preventivamente, Ações para a Conservação da Biodiversidade que estimulem os serviços ecossistêmicos, como já apontado por Reale et al. (2022). Assim, possibilitariam aumentar a resiliência da prestação de serviços ecossistêmicos que serão consumidos nos próximos anos e que sustentarão o crescimento econômico da empresa com o menor impacto possível no longo prazo, pois a tendência será consumir serviços ecossistêmicos estimulados pela própria organização. Ou seja, é possível realizar a quantificação de forma a tornar o consumo de serviços ecossistêmicos de provisão teoricamente sustentável no médio e longo prazo.

Todavia, deverão ser realizadas calibrações desses modelos para cada bioma, além do estudo específico para identificar a proporção de consumo para cada empreendimento, o qual pode ser realizado via produtividade, conforme indicado por Reale et al. (2022). Quanto mais empresas colaborarem para desenvolver esse modelo de “consórcio”, maior seria a proteção e a colaboração para o TWS e menor seria a área de preservação que o consorciado deveria se responsabilizar, desde que atendendo ao montante de recursos hídricos utilizado em seus processos produtivos. Além disso, as diferentes regiões necessitariam ser avaliadas com maior rigor e sensibilidade das amostras gravitacionais pelos sensores do satélite GRACE.

3.4 Conclusão

Nossos resultados demonstram que extensas e conectadas regiões cobertas por vegetação nativa possibilitam maior estabilidade hídrica nos ciclos das chuvas de curto e longo prazo. Além disso, descobrimos e quantificamos que, quanto maior a superfície de vegetação nativa em grandes regiões, maior é o armazenamento terrestre de água e maior é a estabilidade nas tendências de TWS, independente do bioma avaliado.

Ressaltou-se a importância da perpetuação da cobertura de vegetação nativa do bioma Amazônico para a manutenção do ciclo hídrico da América do Sul. Além disso, os resultados sugerem que possíveis eventos extremos, em decorrência das alterações climáticas globais, podem estar sendo amplificados devido à degradação do bioma Cerrado e isso está influenciando no aumento de períodos de seca em outras regiões da América do Sul. Dessa forma, até mesmo para melhor preservar e proteger a Amazônia, faz-se necessário restaurar o bioma Cerrado.

Evidencia-se também que o aumento (diminuição) de precipitação em determinadas regiões não necessariamente fará com que ocorra aumento (diminuição) do TWS, pois isso depende da maior (menor) área de cobertura de vegetação nativa de grandes regiões. Ou seja, os diferentes usos e mudanças na cobertura da terra são os principais responsáveis na alteração das tendências lineares de armazenamento terrestre de água.

Os resultados desse trabalho elucidam uma grande lacuna sobre a importância das vegetações nativas para armazenamento terrestre de água, possibilitando inferir volume de água pelo tamanho da área coberta por vegetação nativa. No entanto, faz-se necessário a calibração do modelo, bem como a confirmação em campo e nos diferentes biomas avaliados.

Por tanto, é possível que organizações, governos e outras iniciativas possam utilizar esses achados para iniciarem medidas de combate às mudanças climáticas, em consonância com o já preconizado pela Organização das Nações Unidas para a década da restauração dos ecossistemas. Dessa forma, consórcios de empresas poderiam desenvolver ações conservacionistas práticas para recuperar o volume de água consumido para a produção de maneira a restaurar os serviços ecossistêmicos preventivamente àquilo que será utilizado no futuro, conforme planejado pela expansão econômica e pelo consumo de água dos últimos anos.

Referências

- ALVES, L. M.; CHADWICK, R.; MOISE, A.; BROWN, J.; MARENGO, J. A. Assessment of rainfall variability and future change in Brazil across multiple timescales. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. S1, p. E1875–E1888, 1 jan. 2021. . Acesso em: 8 set. 2021.
- ARRAUT, J. M.; NOBRE, C.; BARBOSA, H. M. J.; OBREGON, G.; MARENGO, J. Aerial Rivers and Lakes: Looking at Large-Scale Moisture Transport and Its Relation to Amazonia and to Subtropical Rainfall in South America. **Journal of Climate**, v. 25, n. 2, p. 543–556, 15 jan. 2012.
- BENNETT, B. M.; BARTON, G. A. The enduring link between forest cover and rainfall: a historical perspective on science and policy discussions. **Forest Ecosystems**, v. 5, n. 1, p. 5, 1 dez. 2018.
- COHEN, J. A power primer. **Psychological Bulletin**, v. 112, n. 1, p. 155, 1992. . Acesso em: 26 jun. 2022.
- COSTA, M. H.; PIRES, G. F. Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 13, p. 1970–1979, 15 nov. 2010.
- FERRAZ, S. F. B.; LIMA, W. de P. **Hidrologia Florestal Aplicada: planejando as interações entre a floresta e a água**. 1ed. ed. São Paulo/SP: Editora da Universidade de São Paulo, 2022. 320 p.
- FIELD, A. **Discovering statistics using IBM SPSS Statistics**. London: SAGE, 2013.
- FRAPPART, F.; PAPA, F.; GÜNTNER, A.; TOMASELLA, J.; PFEFFER, J.; RAMILLIEN, G.; EMILIO, T.; SCHIETTI, J.; SEOANE, L.; DA SILVA CARVALHO, J.; MEDEIROS MOREIRA, D.; BONNET, M. P.; SEYLER, F. The spatio-temporal variability of groundwater storage in the Amazon River Basin. **Advances in Water Resources**, v. 124, p. 41–52, 1 fev. 2019.
- FRAPPART, F.; RAMILLIEN, G.; RONCHAIL, J. Changes in terrestrial water storage versus rainfall and discharges in the Amazon basin. **International Journal of Climatology**, v. 33, n. 14, p. 3029–3046, 30 nov. 2013.
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 1–21, 8 dez. 2015.
- HUMPHREY, V.; GUDMUNDSSON, L. GRACE-REC: a reconstruction of climate-driven water storage changes over the last century. **Earth System Science Data**, v. 11, n. 3, p. 1153–1170, 2 ago. 2019.
- JEFFREYS, H. **The theory of probability**. 3rd. ed. Oxford: Clarendon Press, 1961.
- LANDERER, F. W.; SWENSON, S. C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. **Water Resources Research**, v. 48, n. 4, abr. 2012.
- LEHNER, B.; GRILL, G. Global river hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world's large river systems. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 15, p. 2171–2186, jul. 2013.
- LEVIA, D. F.; CREED, I. F.; HANNAH, D. M.; NANKO, K.; BOYER, E. W.; CARLYLE-MOSES, D. E.; VAN DE GIESEN, N.; GRASSO, D.; GUSWA, A. J.; HUDSON, J. E.; HUDSON, S. A.; IIDA, S.; JACKSON, R. B.; KATUL, G. G.; KUMAGAI, T.; LLORENS, P.; RIBEIRO, F. L.; PATAKI, D. E.; PETERS, C. A.; CARRETERO, D. S.; SELKER, J. S.; TETZLAFF, D.; ZALEWSKI, M.; BRUEN, M. Homogenization of the terrestrial water cycle. **Nature Geoscience** 2020 13:10, v. 13, n. 10, p. 656–658, 21 set. 2020. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41561-020-0641-y>>. Acesso em: 6 jun. 2022.

- LONGUEVERGNE, L.; SCANLON, B. R.; WILSON, C. R. GRACE hydrological estimates for small basins: Evaluating processing approaches on the High Plains aquifer, USA. **Water Resources Research**, v. 46, n. 11, p. W11517, nov. 2010.
- MAKARIEVA, A. M.; GORSHKOV, V. G.; AM, M.; VG, G. Biotic pump of atmospheric moisture as driver of the hydrological cycle on land. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 2, p. 1013–1033, 2007.
- MAKARIEVA, A. M.; GORSHKOV, V. G.; LI, B.-L. L. Precipitation on land versus distance from the ocean: Evidence for a forest pump of atmospheric moisture. **Ecological Complexity**, v. 6, n. 3, p. 302–307, set. 2009.
- MAKARIEVA, A. M.; GORSHKOV, V. G.; SHEIL, D.; NOBRE, A. D.; LI, B.-L. Where do winds come from? A new theory on how water vapor condensation influences atmospheric pressure and dynamics. **Atmos. Chem. Phys**, v. 13, p. 1039–1056, 2013.
- MALHADO, A. C. M.; PIRES, G. F.; COSTA, M. H. Cerrado conservation is essential to protect the Amazon rainforest. **Ambio**, v. 39, n. 8, p. 580–584, 21 dez. 2010.
- MAPBIOMAS. **Mapbiomas Brasil**. Disponível em: <<https://mapbiomas.org/>>. Acesso em: 20 ago. 2020.
- MARENGO, J. A.; SOUZA, C. M.; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K.; BETTS, R. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, 21 dez. 2018. Disponível em: <<https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2018.00228/full>>. Acesso em: 20 nov. 2020.
- MOLINA, R. D.; SALAZAR, J. F.; MARTÍNEZ, J. A.; VILLEGAS, J. C.; ARIAS, P. A. Forest-Induced Exponential Growth of Precipitation Along Climatological Wind Streamlines Over the Amazon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 5, p. 2589–2599, 16 mar. 2019. . Acesso em: 11 maio. 2021.
- MUÑOZ SABATER, J. **ERA5-Land hourly data from 1981 to present Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)**2019.
- NASA-JPL. **GRACE L-3 Product User Handbook GRACE D-103133 NASA-JPL**. [s.l: s.n.]1–58 p.
- NI, S.; CHEN, J.; WILSON, C. R.; LI, J.; HU, X.; FU, R. **Global Terrestrial Water Storage Changes and Connections to ENSO Events Surveys in Geophysics** Springer Netherlands, 1 jan. 2018.
- NOBRE, A. D. **The Future Climate of Amazonia: Scientific Assessment Report**. São José dos Campos, SP: Sponsored by CCST-INPE, INPA and ARA, 2014. 42 p.
- O'CONNOR, J. C.; DEKKER, S. C.; STAAL, A.; TUINENBURG, O. A.; REBEL, K. T.; SANTOS, M. J. Forests buffer against variations in precipitation. **Global Change Biology**, v. 27, n. 19, p. 4686–4696, 1 out. 2021.
- OLIVEIRA, P. T. S.; NEARING, M. A.; MORAN, M. S.; GOODRICH, D. C.; WENDLAND, E.; GUPTA, H. V. Trends in water balance components across the Brazilian Cerrado. **Water Resources Research**, v. 50, n. 9, p. 7100–7114, set. 2014.
- OUMA, Y. O.; ABALLA, D. O.; MARINDA, D. O.; TATEISHI, R.; HAHN, M. Use of GRACE time-variable data and GLDAS-LSM for estimating groundwater storage variability at small basin scales: a case study of the Nzoia River Basin. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2015.1104743>, v. 36, n. 22, p. 5707–5736, 17 nov. 2015.
- POVEDA, G.; JARAMILLO, L.; VALLEJO, L. F. Seasonal precipitation patterns along pathways of South American low-level jets and aerial rivers. **Water Resources Research**, v. 50, n. 1, p. 98–118, 1 jan. 2014.
- REALE, R.; MAGRO, T. C.; RIBAS, L. C. Measurement and analyses of biodiversity conservation actions of corporations listed in the Brazilian stock exchange's corporate sustainability index. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 14–24, jan. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652617321212>>.

- REALE, R.; MAGRO, T. C.; RIBAS, L. C. Biodiversity conservation actions as a tool to improve the management of sustainable corporations and their needs ecosystem services. **Journal of Cleaner Production**, v. 219, p. 1–10, maio 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619304184>>.
- REALE, R.; RIBAS, L. C.; BORSATO, R.; MAGRO, T. C.; VOIGTLAENDER, M. The LIFE certification methodology as a diagnostic tool of the environmental management system of the automotive industry. **Environmental Science & Policy**, v. 57, p. 101–111, mar. 2016.
- REALE, R.; RIBAS, L. C.; MAGRO LINDENKAMP, T. C. Ecosystem services as a ballast to guide sustained economic growth by biodiversity conservation actions. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, p. 131846, 15 jul. 2022. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652622014561>>. Acesso em: 9 maio. 2022.
- RODELL, M.; CHEN, J.; KATO, H.; FAMIGLIETTI, J. S.; NIGRO, J.; WILSON, C. R. Estimating groundwater storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. **Hydrogeology Journal**, v. 15, n. 1, p. 159–166, fev. 2007.
- RODELL, M.; FAMIGLIETTI, J. S. Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time dependent gravity field. **Water Resources Research**, v. 35, n. 9, p. 2705–2723, 1999.
- RODELL, M.; FAMIGLIETTI, J. S. An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). **Water Resources Research**, v. 37, n. 5, p. 1327–1339, 2001.
- SALAZAR, A.; BALDI, G.; HIROTA, M.; SYKTUS, J.; MCALPINE, C. Land use and land cover change impacts on the regional climate of non-Amazonian South America: A review. **Global and Planetary Change**, v. 128, p. 103–119, 1 maio 2015. . Acesso em: 6 jun. 2022.
- SHEIL, D. Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle. **Forest Ecosystems** 2018 5:1, v. 5, n. 1, p. 1–22, 20 mar. 2018. Disponível em: <<https://link.springer.com/articles/10.1186/s40663-018-0138-y>>. Acesso em: 2 jun. 2022.
- SHEIL, D.; BURSLEM, D. F. R. P. Disturbing hypotheses in tropical forests. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 18, n. 1, p. 18–26, 1 jan. 2003. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169534702000058>>. Acesso em: 27 set. 2021.
- SHEIL, D.; MURDIYARSO, D. **How forests attract rain: An examination of a new hypothesis** **BioScience** Oxford Academic, 1 abr. 2009. Disponível em: <www.ucpressjournals.com/reprintinfo.asp>. Acesso em: 9 maio. 2021.
- SPERA, S. A.; GALFORD, G. L.; COE, M. T.; MACEDO, M. N.; MUSTARD, J. F. Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. **Global change biology**, v. 22, n. 10, p. 3405–3413, 1 out. 2016. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcb.13298>>. Acesso em: 17 nov. 2020.
- SUN, A. Y.; GREEN, R.; SWENSON, S.; RODELL, M. Toward calibration of regional groundwater models using GRACE data. **Journal of Hydrology**, v. 422–423, p. 1–9, 23 fev. 2012.
- SWENSON, S. C. GRACE MONTHLY LAND WATER MASS GRIDS NETCDF RELEASE 5.0. Ver. 5.0. **PO.DAAC, CA, USA**, 2012.
- SWENSON, S.; WAHR, J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. **Geophysical Research Letters**, v. 33, n. 8, abr. 2006.

- TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; RIES, J. C.; THOMPSON, P. F.; WATKINS, M. M. GRACE Measurements of Mass Variability in the Earth System. **Science**, v. 305, n. 5683, p. 503–505, 23 jul. 2004a. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.1099192>>.
- TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; WATKINS, M.; REIGBER, C. The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. **Geophysical Research Letters**, v. 31, n. 9, p. n/a-n/a, 16 maio 2004b.
- WANG-ERLANDSSON, L.; TOBIAN, A.; VAN DER ENT, R. J.; FETZER, I.; TE WIERIK, S.; PORKKA, M.; STAAL, A.; JARAMILLO, F.; DAHLMANN, H.; SINGH, C.; GREVE, P.; GERTEN, D.; KEYS, P. W.; GLEESON, T.; CORNELL, S. E.; STEFFEN, W.; BAI, X.; ROCKSTRÖM, J. A planetary boundary for green water. **Nature Reviews Earth & Environment** 2022 3:6, v. 3, n. 6, p. 380–392, 26 abr. 2022.
- WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, n. 3–4, p. 261–269, 1 set. 2007.

Apêndice

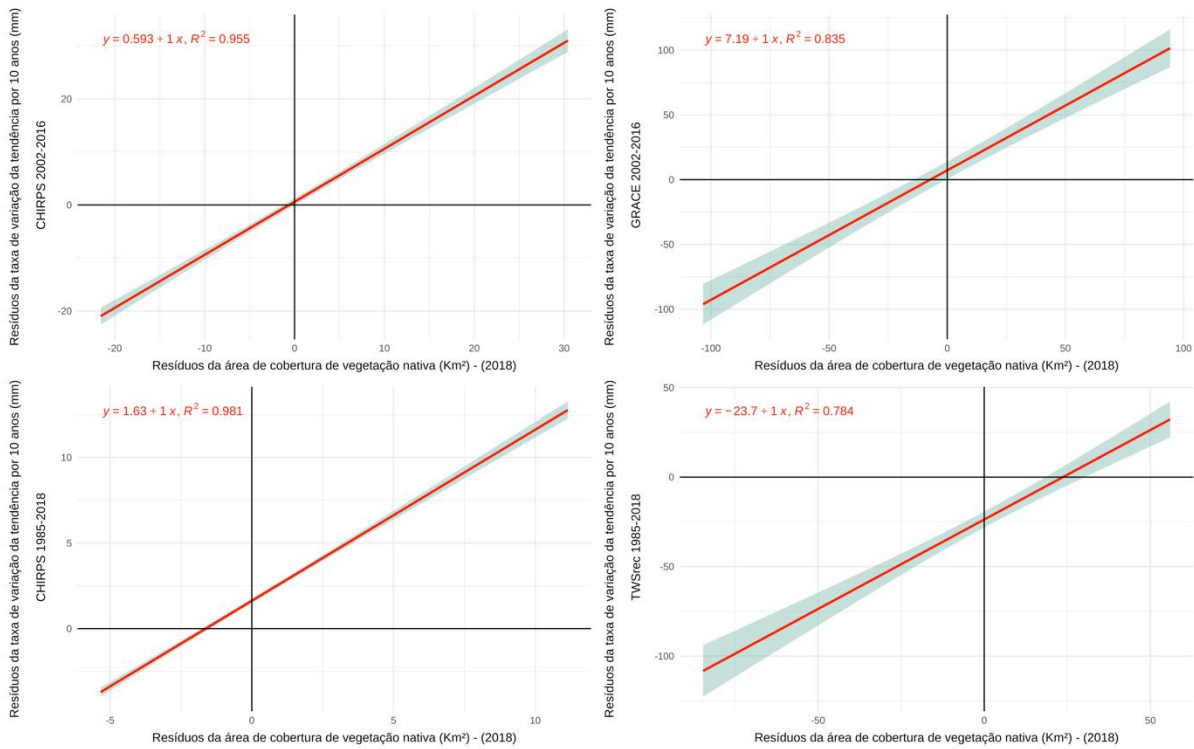


Figura Suplementar 14. Resíduos

4 CONCLUSÃO

Apesar dos avanços ambientais e inúmeras melhorias nos setores produtivos nas últimas décadas, o planeta ainda passa por graves crises ambientais, colocando em risco o bem estar da sociedade humana. Apesar dos setores econômicos serem totalmente dependentes dos serviços ecossistêmicos e sua biodiversidade associada, são raras as ações para a conservação da biodiversidade desenvolvidas por empresas com foco em, minimamente, repor os recursos naturais consumidos ou possibilitar para que os ambientes naturais possam ser estimulados a continuarem provisionando os serviços ecossistêmicos necessários a todos. Isso se deve, em parte, à grande dificuldade de mensurar os limites da natureza e esse dado ser um valor abstrato.

Como a economia continuará crescendo, a degradação ambiental pelo consumo de recursos naturais também aumentará (“Paradoxo de Jevons”). Assim, para interromper o Paradoxo de Jevons, as empresas devem implementar ações conservacionistas que acelerem a resiliência e a resistência dos ecossistemas.

Assim, foi proposto que os serviços ecossistêmicos poderiam ser utilizados como lastro para um crescimento econômico que respeite a resiliência dos ecossistemas. Dessa forma, projetos de governança poderiam ser elaborados para indicar qual deve ser o ACB a ser desenvolvido para que os resultados positivos nos ecossistemas ocorram antes do crescimento econômico, como escudo para evitar danos ambientais e perpetuar os serviços ecossistêmicos tão necessários a toda vida no planeta. Assim, a conservação da biodiversidade precisa ser entendida como uma articulação de todos os objetivos de desenvolvimento da sustentabilidade, dada a sua importância para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Assim, a reconstrução da funcionalidade dos ecossistemas aliada à velocidade de consumo dos recursos naturais deve respeitar a resiliência do ecossistema, orientando um crescimento econômico sustentável e biodiverso.

Um novo olhar sobre o termo “sustentabilidade” foi apresentado, no qual o tripé deve estar focalizado nas ações para a conservação da biodiversidade, uma vez que para desenvolver qualquer ação conservacionista, são necessários cumprir critérios econômicos, sociais e ambientais. Aqui, ao considerar conservação da biodiversidade, devem ser entendidos e considerados tanto os componentes bióticos e abióticos, sem os quais não existe os serviços ecossistêmicos.

Para tanto, investigamos a importância de extensas e conectadas superfícies de vegetação nativa para a estabilidade hídrica nos ciclos das chuvas de curto e longo prazo. Além disso, descobrimos e quantificamos que, quanto maior a superfície de vegetação nativa em grandes regiões, maior é o armazenamento terrestre de água e maior é a estabilidade nas tendências de precipitação para aquelas regiões e regiões circunvizinhas, independente do bioma avaliado. Então, a preservação e aumento de áreas naturais com vegetação nativa poderiam possibilitar maior resiliência às adversidades climáticas, maior estabilidade hídrica e até mesmo redução de temperatura regionais e em escala continental. Neste contexto, ressalta-se a importância do bioma Amazônico para a manutenção do ciclo hídrico para todo o continente da América

do Sul. Aliado à proteção da floresta amazônica, o bioma Cerrado deveria ser igualmente protegido e restaurado, visto que sua importância para o ciclo hídrico da América do Sul é muito grande. Não obstante, porém em escala regional, os demais biomas avaliados (Mata Atlântica, Pampas, Pantanal, Caatinga e Chaco) possuem importâncias singulares para o ciclo hídrico em escala regional e deveriam receber maior atenção quanto à sua preservação, em especial, Chaco, Pampas, Caatinga e Pantanal que contam com baixo número de unidades de conservação, tanto em número de unidades quanto em extensão protegida.

O armazenamento de água terrestre está mais correlacionado com a área de cobertura de vegetação nativa de grandes regiões. Dessa forma, foi possível esboçar uma sugestão de plano inicial para que os tomadores de decisão tenham acesso a uma ferramenta prática e concisa para combater o aquecimento global, crise da biodiversidade, e crise hídrica por meio da quantificação do TWS ao estimularem a conservação, preservação e restauração dos ecossistemas de maneira generalizada em todo o continente sul-americano.

Dessa forma, os setores econômicos deveriam inserir as ações para a conservação da biodiversidade como eixo principal para tomarem decisões, uma vez que a produção empresarial, de qualquer setor, é dependente direta e indiretamente dos recursos naturais. Considerando a água, em todas as suas formas, como principal recurso natural para a vida no planeta, deve ser o foco das ações de conservação, uma vez que ao proteger e estimular o armazenamento de água terrestre, automaticamente estará protegendo todos os meios bióticos e abióticos.

5 CÓDIGOS E SCRIPTS

Todos os códigos e scripts utilizados nesta Tese estão disponibilizados no link a seguir, nos subdomínios “PhDPaper01” e “PhDPaper02”: <https://github.com/realericardo>. Além disso, em caso de necessidade, os códigos e scripts poderão ser solicitados diretamente ao autor por meio do e-mail: realericardo@gmail.com.