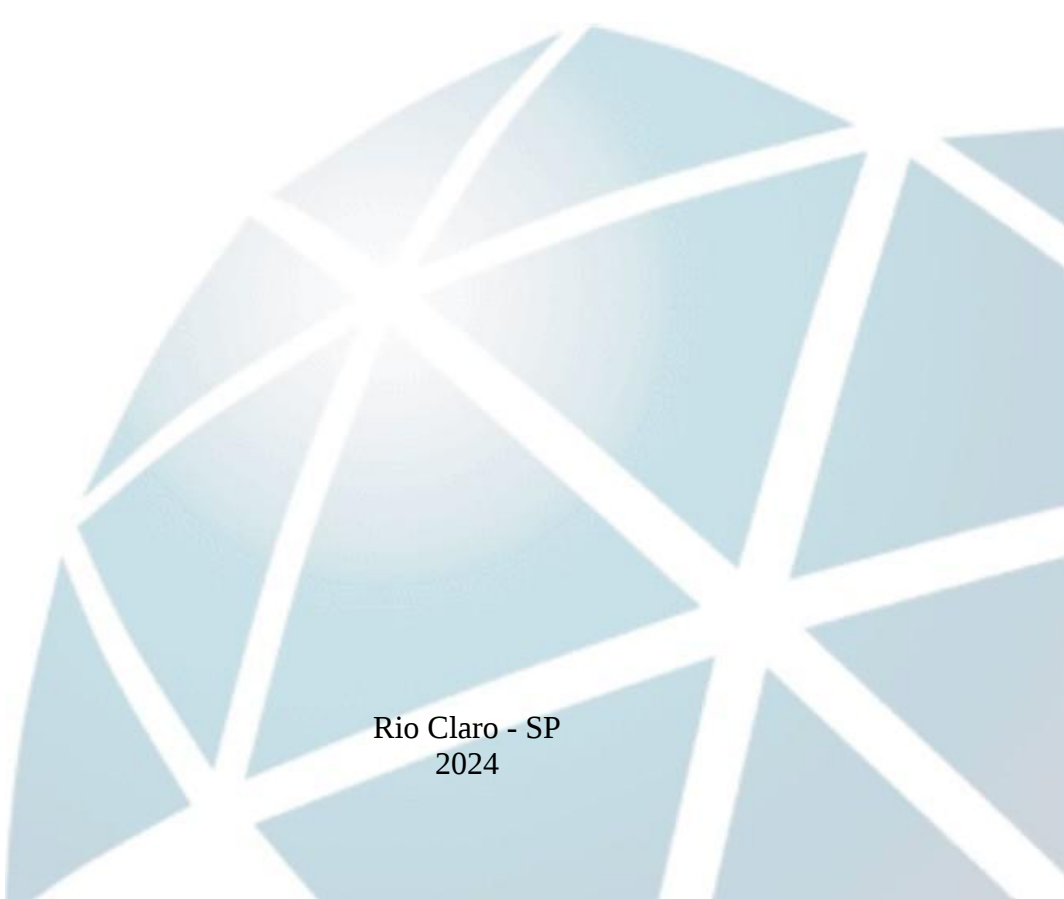

ECOLOGIA

Isabela Bonfiglioli Lopes

**MODELAGEM DA RESPIRAÇÃO
HETEROTRÓFICA SOB ÍNDICES REDUZIDOS DE
PRECIPITAÇÃO NA FLORESTA AMAZÔNICA**



Rio Claro - SP
2024

Isabela Bonfiglioli Lopes

MODELAGEM DA RESPIRAÇÃO HETEROTRÓFICA SOB ÍNDICES REDUZIDOS DE PRECIPITAÇÃO NA FLORESTA AMAZÔNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Biociências – Câmpus de Rio Claro, da
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho”, para obtenção do grau de Ecóloga.

Orientador(a): Milton Cezar Ribeiro

Coorientador(a): Bárbara Ap^a Pereira da Rocha Cardeli.

Rio Claro - SP
2024

L864m

Lopes, Isabela Bonfiglioli

Modelagem da respiração heterotrófica sob índices reduzidos de precipitação na floresta amazônica / Isabela Bonfiglioli Lopes. -- Rio Claro, 2024

43 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Ecologia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro

Orientadora: Milton Cezar Ribeiro

Coorientadora: Bárbara Aparecida Pereira da Rocha Cardeli

1. Mudanças Climáticas. 2. Modelagem. 3. Biodegradação. 4. Influências florestais. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Biociências, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Isabela Bonfiglioli Lopes

MODELAGEM DA RESPIRAÇÃO HETEROTRÓFICA SOB ÍNDICES REDUZIDOS DE PRECIPITAÇÃO NA FLORESTA AMAZÔNICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Biociências, Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para obtenção do grau de Ecóloga.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Milton Cezar Ribeiro

Prof. Dr. Bárbara Ap^a Pereira da Rocha Cardeli.

Prof. Dr. Bianca Fazio Rius

Prof. Dr. Carolina Blanco Casagrande

Aprovado em: 04 de junho de 2024

Assinatura do discente

Assinatura do(a) orientador(a)

Assinatura do(a) coorientador(a)

*Dedico este trabalho a todos que contribuíram de forma positiva para
minha graduação.*

*Dedico aos meus pais Angélica Buonfiglioli e Alexandre Leite Lopes,
por me incentivarem e acreditarem na minha capacidade.*

*Dedico especialmente ao Dorival Lopes, meu querido avô e inspiração,
que me acompanha lá de cima e sempre acreditou na minha formação
de olhos fechados.*

*E por fim, dedico a Ecologia! E a todos os ecólogos que lutam pelo
reconhecimento da nossa profissão.*

AGRADECIMENTOS

Tenho muito a agradecer a todos que estiveram na minha vida durante esse período tão mágico e conturbado que foi a graduação. Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, por me incentivarem a seguir minha carreira dos sonhos, mesmo com todas as incertezas e possíveis dificuldades. Obrigada por confiarem na minha capacidade acadêmica e independência desde o início, desde o momento da aprovação, até os pequenos (não tão pequenos) surtos durante essa reta final. Pai, obrigada por todas as idas e vindas de Rio Claro, por toda a ajuda com as mudanças, mercados e responsabilidades da casa, mas principalmente obrigada pelo carinho e pela confiança, eu com certeza estaria perdida sem seu apoio. Mãe, obrigada por todas as tentativas de me acalmar durante essa fase de transição, obrigada por sempre me escutar e acreditar no meu potencial independente da situação, seu amor me dá forças para enfrentar as aventuras da vida, admiro muito a mulher que você é. Você é meu passarinho.

Agradecimento especial às amigas que fiz na Unesp: Guria, Vogue e P, por cada conversa, festa, trabalho em grupo, caídas de bicicleta, momentos bons, ruins e engraçados que vivemos juntas, foi maravilhoso poder dividir esse momento da vida com vocês, desde os primeiros dias em 2019, até a formatura. Não podia deixar de citar aqui a Rep. Dungas, que me acolheu, ou melhor me salvou, quando cheguei em Rio Claro. Morar com vocês (Kinder, Saci e Pit) foi a melhor escolha que eu poderia ter feito, nunca vou esquecer dos momentos que vivemos juntas, vocês me ensinaram que lar não é só uma casa, mas sim as pessoas e os momentos que cultivamos, obrigada por tudo! E obrigada a todas as amigas que fiz durante esses seis anos de faculdade.

Quero agradecer a Ana Carolina e a Camilla principalmente, por cada conversa, cada ligação de horas, cada risada e cada choro durante tantos anos da minha vida. Obrigada por estarem comigo do início ao fim, nossa conexão é de alma e a vida fica muito mais colorida com vocês do meu lado.

Obrigada ao David Lapola e a equipe do LabTerra por me acolherem e toparem fazer parte deste projeto, admiro muito o trabalho de vocês! Obrigada mais que especial a Bárbara Cardeli, por me orientar neste projeto e, mesmo de longe, atender a todos meus pedidos de socorro! Aprendi muito durante esse período e agradeço demais pela parceria e pela orientação de uma forma leve e tranquila. Obrigada também ao meu primo Ignácio, que me salvou com as programações nessa reta final do TCC.

Um último agradecimento ao meu vizinho, Dorival. Sei que ele está vendo tudo lá de cima e continua torcendo por mim, como sempre fez. Grande parte do meu amor à Ecologia vem das nossas memórias no lago, alimentando os patinhos e observando os passarinhos e macaquinhos que vimos passar quando eu era criança. Pode deixar que aqui embaixo eu vou continuar “cuidando da natureza” como o senhor falava. Obrigada por tudo!

RESUMO

De acordo com o atual cenário das mudanças climáticas, alterações graves nos níveis pluviométricos estão cada vez mais previstas. Na região central amazônica, por exemplo, estudos e previsões demonstram uma tendência de reduções significativas na precipitação. Fato que acaba impactando os processos ecológicos e a dinâmica dos ecossistemas. Independente do bioma, sabe-se que componentes tanto bióticos como abióticos atuam em conjunto para garantir o funcionamento dos ecossistemas e a manutenção dos processos ecológicos. A respiração heterotrófica, por exemplo, é o processo que envolve a respiração de organismos decompositores que habitam o solo, no qual há absorção de oxigênio (O_2) e liberação de gás carbônico (CO_2) na atmosfera. Este processo além de ser extremamente importante para o funcionamento do ecossistema, exerce um papel central para o ciclo de carbono, uma vez que o solo é o maior reservatório de carbono nos ecossistemas terrestres. Sendo assim, são necessários estudos que abordem a relação entre as reduções previstas na precipitação e o processo de respiração heterotrófica, dado que este processo acaba sendo altamente dependente de fatores como umidade e temperatura. Com isso, o objetivo principal deste trabalho é analisar de que forma as alterações na precipitação, decorrentes das mudanças climáticas, afetam o processo de respiração heterotrófica na Amazônia. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica e os dados climáticos da plataforma IPCC WGI - Interactive Atlas, a fim de obter três cenários distintos de precipitação e usá-los no modelo CAETÊ (*CARbon and Ecosystem functional Trait Evaluation model*), modelo dinâmico de vegetação global (DGVM) baseado em atributos funcionais variantes (*trait-based*). A partir do modelo, percebeu-se uma redução na média geral da respiração heterotrófica em cenários extremos de redução na precipitação, mas que não se mostraram estatisticamente significativos. Isso pode acontecer devido a outros fenômenos e alterações climáticas que ocorreram durante os anos analisados e que também tiveram um certo impacto nas taxas de respiração, mostrando a importância de se considerar mais de uma variável climática ao analisar alterações na respiração heterotrófica de um ecossistema. Assim, apesar de pouco significativo, pode-se observar uma tendência negativa nas taxas de respiração heterotrófica conforme a redução na precipitação prevista para o cenário amazônico.

Palavras-chave: Modelagem; Amazônia; respiração heterotrófica; pluviometria

ABSTRACT

Considering the current scenario of global climate change, alterations in precipitation levels are getting worse with time. According to the majority of studies and predictions, there is a significant decrease in precipitation levels expected for the central region of the Amazon, which affects ecological processes and ecosystem dynamics. Regardless of the biome, it is known that both biotic and abiotic components of nature act together with various ecological and climatic processes to ensure the functioning of the ecosystem as a whole. Thus, each phenomenon, species, and process has its importance within a natural system. Based on this, the main focus of this project will be on heterotrophic respiration, the process involving the respiration of decomposer organisms that inhabit the soil, in which oxygen (O₂) is absorbed and carbon dioxide (CO₂) is released to the atmosphere. This process is extremely important for ecosystem functioning, especially for the carbon cycle, due to the fact that the soil is the largest active store of carbon in terrestrial ecosystems. Therefore, studies are needed that address the relationship between the predicted reductions in precipitation and the heterotrophic respiration process, as this process is highly dependent on factors such as humidity and temperature. With this in mind, the primary aim of the study is to examine how alterations in precipitation, resulting from climate change, can impact the heterotrophic respiration process in the Amazon. For this purpose, a literature review and climatic data from the IPCC WGI - Interactive Atlas platform were used to obtain three distinct precipitation scenarios, which were then used in the CAETÊ model (*C*arbon and *E*cosystem functional *T*rait *E*valuation model), a dynamic global vegetation model (DGVM) based on variant functional attributes (*trait-based*). As a result from the model, a decrease in the overall average of heterotrophic respiration was observed in extreme scenarios of reduced precipitation, although it did not prove to be statistically significant. This could be attributed to other phenomena and climatic changes that occurred during the analyzed years, which also had some impact on respiration rates, highlighting the importance of considering more than one climatic variable when analyzing changes in heterotrophic respiration within an ecosystem. Thus, despite being somewhat insignificant, a negative trend in heterotrophic respiration rates could be observed with the predicted reduction in precipitation.

Keywords: Dynamic model; Amazon; heterotrophic respiration; rainfall.

Title in english: Heterotrophic respiration modeling under reduced precipitation indices in the Amazon rainforest.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípios do modelo CAETÊ.....	17
Figura 2 - Médias bianuais nclim e RCP2.....	26
Figura 3 - Médias bianuais nclim e RCP6.....	27
Figura 4 - Médias bianuais nclim e RCP8.....	27
Figura 5 - Boxplot comparativo nclim e RCP2.....	28
Figura 6 - Boxplot comparativo nclim e RCP6.....	29
Figura 7 - Boxplot comparativo nclim e RCP8.....	30
Figura 8 - Eventos El Niño e La Niña ao longo dos anos.....	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de precipitação obtidos a partir dos três cenários na plataforma IPCC WGI - Interactive Atlas.....	16
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ENOS El Niño Oscilação Sul

IPCC Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

CAETÊ Carbon and Ecosystem functional Trait Evaluation modelo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	METODOLOGIA.....	15
2.2	Coleta de dados IPCC	18
2.3	O Modelo CAETÊ	18
2.4	Área de estudo	18
2.5	Dados climáticos e protocolo e modelagem	18
3	RESULTADOS.....	18
3.1	Revisão Bibliográfica	18
3.1.1	<i>Precipitação na floresta amazônica</i>	<i>20</i>
3.1.2	<i>Mudanças climáticas e precipitação</i>	<i>20</i>
3.1.3	<i>Mudanças climáticas na Amazônia.....</i>	<i>21</i>
3.1.4	<i>Respiração heterotrófica na Amazônia</i>	<i>22</i>
3.1.5	<i>Mudanças climáticas e respiração heterotrófica</i>	<i>23</i>
3.1.6	<i>Precipitação e respiração heterotrófica.....</i>	<i>24</i>
3.2	Dados gerados no modelo	26
4	DISCUSSÃO.....	30
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	34
	REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

Como consequência das ações antrópicas globais, as mudanças climáticas estão cada vez mais evidentes e preocupantes nos meios naturais. Essas mudanças afetam diretamente todas as formas de vida na Terra causando impactos no funcionamento dos ecossistemas terrestres e aquáticos (Hisano, 2017). Através, por exemplo, do derretimento das calotas polares, da elevação do nível do mar, do aumento das queimadas e na extinção e redistribuição de espécies (Castro, 2010).

Uma consequência comum das mudanças climáticas é a alteração dos índices pluviométricos, isto é, a quantidade de chuva por metro quadrado em determinado local e em determinado período. De modo que, diante das alterações climáticas, períodos de precipitação extrema ou períodos de seca prolongada podem se tornar mais recorrentes, causando problemas como enchentes, inundações e alteração nas dinâmicas dos ecossistemas (Meir et al., 2009).

Essas mudanças na precipitação já são observadas como consequência de dois fenômenos naturais, sendo eles o aquecimento das águas do Atlântico Norte e o El Niño-Oscilação Sul (ENOS) que ocorre de dois a sete anos e é responsável por uma alteração na temperatura das águas superficiais do Oceano Pacífico, podendo corresponder a um aumento de temperatura (El Niño) ou uma diminuição da temperatura (La Niña). Ambos os fenômenos do ENOS têm como principal consequência alterações nos índices pluviométricos de algumas partes do planeta, sendo o El Niño relacionado a secas e temperaturas altas que afetam geralmente o nordeste e o sudeste do Brasil, e La Niña relacionada a um grande aumento na precipitação que pode ser observada na região norte do Brasil (Freire, 2011). Entretanto, apesar deste fenômeno já possuir grande impacto nas condições climáticas do planeta, estudos mostram que, mesmo ele sendo um processo que ocorre naturalmente, as mudanças climáticas acabam agravando esse fenômeno (Jones, 2022), fazendo com que os eventos de chuvas extremas e longos períodos de seca sejam cada vez mais intensos.

O impacto disso pode ser observado em várias regiões do planeta e em diversos biomas, como, por exemplo, no bioma amazônico. O bioma amazônico é caracterizado pelo clima equatorial úmido e com uma fitofisionomia de Floresta Ombrófila Densa, ou seja, é uma região de temperaturas elevadas e alta pluviosidade. Além disso, o bioma também é conhecido por sua vegetação densa e volumosa, e por possuir altos níveis de biomassa e ciclagem de nutrientes (Costa, 2019). De acordo com essas características, a Amazônia depende de diversas variáveis que juntas garantem seu desempenho ecológico.

As dinâmicas ecológicas e o funcionamento de um ecossistema, por sua vez, dependem de fatores bióticos e abióticos atuando em conjunto, nesse contexto é importante ressaltar que cada espécie, processo e fenômeno natural possui seu papel e sua importância para a ecologia de determinada região. Sabendo disso, o foco de estudo deste trabalho será a respiração heterotrófica, um processo que, além de contribuir para as dinâmicas de um ecossistema, possui grande importância para a Amazônia e possivelmente será influenciado diretamente pelas mudanças climáticas e a alteração dos índices pluviométricos.

A respiração heterotrófica é o processo de respiração do solo, no qual ocorre a absorção de oxigênio (O_2) e a liberação de gás carbônico (CO_2) na atmosfera. Essa respiração é consequência do processo de decomposição que acontece no solo realizado por organismos heterotróficos como fungos e alguns microrganismos (Yue He, 2022). Como é demonstrado em diversos estudos, a decomposição é um processo completamente dependente de fatores como umidade e temperatura, uma vez que os microrganismos atuam melhor em ambientes com temperatura e umidade mais elevadas, desta maneira as mudanças no clima afetam diretamente esse processo (Castanho, 2005). Além disso, a quantidade de CO_2 liberada na atmosfera durante esse processo é muito significativa para o ciclo de carbono, uma vez que o solo é considerado o maior reservatório de carbono nos ecossistemas terrestres (Oliveira, 2015). Com isso, esse processo possui não somente uma grande importância para o funcionamento dos ecossistemas, mas também para questões como a liberação de carbono na atmosfera, agravando fenômenos como o aquecimento global e o efeito estufa.

Considerando o agravamento das mudanças climáticas, as alterações nos índices pluviométricos e a grande importância do processo de respiração heterotrófica para o bioma amazônico, são necessários estudos que busquem entender a relação destes processos para compreender futuros cenários na Amazônia. A partir disso, este trabalho tem como objetivo principal, analisar como as mudanças climáticas e a redução dos índices pluviométricos podem afetar o processo de respiração heterotrófica, uma vez que este processo é influenciado negativamente pela falta de umidade no solo (Moyano, 2013). Para isso, serão compilados dados e simulações referentes à região central da Amazônia, região muito afetada por secas durante os eventos de El Niño.

Assim, a hipótese do estudo é de que haverá uma diminuição nas taxas de respiração heterotrófica conforme a diminuição dos índices pluviométricos, como é previsto para os próximos anos.

2 METODOLOGIA

2.1. Revisão Bibliográfica

Para a primeira parte da metodologia, foi utilizado o método de revisão bibliográfica, a fim de obter dados acerca dos principais temas que envolvem esta pesquisa, para análise e maior entendimento dos assuntos abordados.

Para realizar a pesquisa foram utilizados seis termos base de acordo com o tema e objetivo principal da pesquisa, sendo eles: Precipitação na floresta amazônica; Mudanças climáticas e precipitação; Respiração heterotrófica na Amazônia; Precipitação e respiração heterotrófica; e Mudanças climáticas e respiração heterotrófica. A partir desses termos de pesquisa, foram encontrados 43 estudos considerados eficazes e complementares para a pesquisa, resultando nas discussões de cada termo separados por tópicos.

A busca pelos artigos foi feita através das plataformas Google Acadêmico, Scielo, Nature e Wiley, utilizando os termos citados tanto em português como em inglês e procurando realizar uma filtragem de estudos mais recentes (próximos ou a partir do ano 2000) para resultados mais coerentes.

2.2. Coleta de dados IPCC

Após a leitura e estudo das referências, buscou-se dados de previsão sobre os índices pluviométricos diretamente do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, através da plataforma IPCC WGI - Interactive Atlas), a fim de entender quais as previsões possíveis para mudanças na precipitação da região central da Amazônia a longo prazo, e usar estes dados no modelo CAETÊ, resultando nas taxas de respiração heterotrófica. Nessa plataforma, é possível filtrar diversos fatores a fim de aperfeiçoar os resultados da previsão. Para este trabalho, selecionamos os filtros de forma a considerar a área de estudo (a região central da Amazônia), a variável climática a ser alterada (redução na precipitação) e considerando três cenários possíveis.

Com relação aos cenários projetados na plataforma, foram usadas três situações: Um cenário otimista (SSP1-2.6), um cenário intermediário (SSP2-4.5) e um pessimista (SSP5-8.5), permitindo uma melhor visualização da previsão geral, levando em consideração três situações

distintas. Aplicando estes filtros na plataforma do IPCC, foram obtidas as seguintes projeções para mudança na precipitação para a região central da Amazônia:

Tabela 1 - Dados de precipitação obtidos a partir dos três cenários na plataforma IPCC WGI - Interactive Atlas.

Cenários	Total Precipitation - Change %
SSP1 - 2.6 (RCP2)	-3.9
SSP2 - 4.5 (RCP6)	-5.8
SSP5 - 8.5 (RCP8)	-14.8

Fonte: Isabela Lopes, 2024.

A partir desses dados pode-se perceber que, para todos os cenários usados neste trabalho, a previsão geral é de uma redução nas taxas de precipitação para a região central da Amazônia, sendo que em um cenário otimista a redução seria de -3.9% na precipitação anual e em um cenário pessimista, a redução seria de -14.8%. Assim, seguindo a metodologia deste estudo, os dados obtidos serão utilizados de base para estimar, através do modelo CAETÊ, como cada um desses cenários de redução na precipitação vai impactar no processo de respiração heterotrófica para a região central do bioma amazônico.

2.3. O Modelo CAETÊ

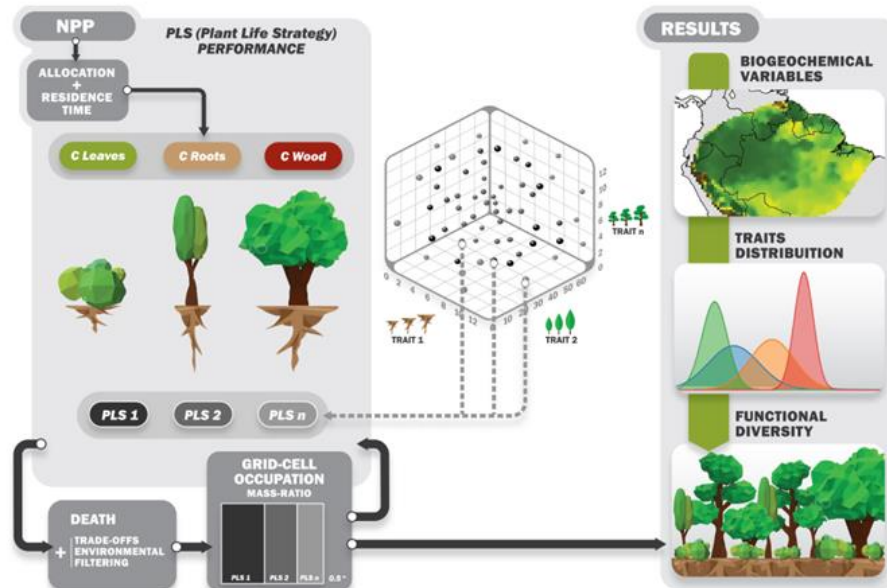
O modelo CAETÊ (*C*arbon and *E*cosystem functional *T*rait *E*valuation model) é um modelo dinâmico de vegetação global (DGVM) baseado em atributos funcionais variantes (*trait-based*) que está sendo desenvolvido no Laboratório de Ciências do Sistema Terrestre (LabTerra) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) (Cardeli, 2021).

A premissa fundamental deste modelo é representar a variabilidade das características funcionais encontradas nas comunidades de plantas, principalmente em ecossistemas extremamente diversos como a floresta amazônica. Para tal, assume-se que a faixa de valores de um atributo observado na natureza pode ser visto como um eixo de um hipervolume

multidimensional formado pela combinação de n atributos funcionais escolhidos (Fig. 1; Villéger; Mason; Mouillot, 2008; Rius *et al.* 2023). Desta maneira, cada indivíduo passa a ser representado por uma combinação única de valores para cada atributo funcional, originando assim diferentes “estratégias de vida de planta” (PLS, da sigla para ‘*Plant Life Strategies*’). As diferentes estratégias são simuladas simultaneamente usando as mesmas parametrizações ecofisiológicas e as mesmas forçantes climáticas, de modo que apenas a combinação de valores dos atributos funcionais variam de uma estratégia para outra. Com isso, em um processo análogo à filtragem ambiental (Diaz; Cabido; Casanoves, 1998; Webb *et al.*, 2010; Rius *et al.*, 2023), a sobrevivência das PLSs também será distinta nas diferentes regiões geográficas.

Uma vez que as características funcionais respondem à mudanças no ambiente e também afetam o ecossistema (Rius *et al.*, 2023), mudanças nas condições ambientais podem levar a mudanças na ocorrência dos atributos funcionais, e modificar a composição funcional da comunidade simulada e, desta maneira, os processos ecossistêmicos relacionados.

Figura 1 - Figura ilustrativa dos princípios gerais que norteiam o modelo CAETÊ. PLS são estratégias de vida de planta (da sigla em inglês para ‘*Plant Life Strategy*’).



Fonte: Rius *et al.*, 2023.

2.4. Área de estudo

A área de estudo do presente projeto engloba a região central da Amazônia Brasileira, região de floresta considerada como uma das mais diversas e importantes do mundo, onde diversos fatores ambientais atuam em conjunto para formar este ecossistema complexo que é lar de uma abundância de espécies tanto vegetais quanto animais (Oliveira; Amaral, 2004).

Fatores como a localização geográfica e a hidrografia da região são cruciais para fazer deste bioma o mais diverso do mundo. Por estar localizada na região equatorial do planeta, a região amazônica conta com temperaturas altas que se mantêm parecidas, mesmo durante os períodos mais frios como o outono e inverno, com uma variação nas médias anuais de apenas 1-2 °C. Além disso, a região também possui uma precipitação média anual de aproximadamente 2300 mm/ano e uma bacia hidrográfica extensa (Fisch et al., 1998).

2.5. Dados climáticos e protocolo e modelagem

O modelo CAETÊ funciona a partir de dados climáticos diários de precipitação, temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica e radiação solar de ondas curtas, além de valores de concentração atmosférica de CO₂. Esses dados são advindos do modelo ISI-MIP2 (Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project 2) para o período de 1979-2016. Neste projeto, os dados climáticos foram alterados conforme as previsões obtidas da plataforma pública do IPCC para a região central amazônica, considerando três cenários distintos de alteração.

A partir da obtenção dos dados de precipitação, foram realizados quatro tipos de simulações alterando somente a precipitação e mantendo as outras variáveis climáticas consideradas pelo modelo sem quaisquer alterações. A primeira simulação, considerando a taxa de precipitação sem alterações, que chamamos de “nclim”, é a partir dela que são geradas as estratégias de vida (PLS) que serão usadas de base para as próximas simulações. Assim, a segunda simulação já considera as estratégias de vida criadas, porém em um novo cenário com redução de -3,9% da precipitação, denominado de “RCP2”, sendo o cenário mais otimista. A terceira simulação foi feita da mesma maneira que a segunda, mas considerando uma redução intermediária de -5,8% do qual chamaremos de “RCP6”. Por fim, a quarta simulação foi feita igualmente, considerando um cenário pessimista de -14,8%, denominado de “RCP8” na redução da precipitação. Para todos os cenários foi avaliado as taxas de respiração heterotrófica

de maneira temporal e espacial, comparando os resultados obtidos no experimento com aqueles dados retirados da literatura.

3. Resultados

3.1. Revisão Bibliográfica

3.1.1. Precipitação na floresta amazônica

O bioma amazônico é conhecido principalmente por ser uma região ampla e contínua de floresta tropical nativa, pela sua enorme diversidade de fauna e flora, mas também por sua abundância em recursos hídricos (Motta, 2020). A bacia amazônica, apesar de apresentar diferentes quantidades de precipitação anual, dependendo da região estudada, possui índices pluviométricos muito significativos, de forma geral. Segundo o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), a precipitação média da região amazônica é em torno de 2300 mm por ano, sendo que em determinadas regiões, mais especificamente nas fronteiras entre Brasil, Colômbia e Venezuela, pode chegar até 3500 mm por ano.

Apesar de ser uma região extremamente úmida, a Amazônia possui períodos chuvosos mais intensos entre os meses de janeiro a maio (verão e outono, respectivamente) e períodos mais secos entre os meses de julho a novembro (inverno e primavera; SOUZA, 2017). Entretanto, isso não significa que não há ocorrência de chuvas durante os períodos mais secos.

A precipitação na bacia amazônica ocorre por influência de diversos fatores, sendo os principais:

- A produção de vapor para a atmosfera, decorrente da alta temperatura média da região e sua disponibilidade hídrica (Fish et al., 1998).
- A relação oceano-atmosfera, através dos eventos climáticos El Niño e La Niña, que tem como consequência a períodos de seca e períodos de chuva extrema respectivamente (Freire, 2011).
- Fatores meteorológicos como as movimentações das cédulas de Walker e Hadley, que por sua vez interferem nas bandas de nebulosidade, controlando as

intensificações da precipitação principalmente na região norte da América do Sul (Souza, 2009).

Com isso, pode-se observar que a precipitação no bioma amazônico é consequência de um conjunto de eventos climáticos e meteorológicos extremamente importantes para a região e que estão claramente suscetíveis às mudanças climáticas, assim como o próprio bioma (Silva, 2017). Logo, é de extrema importância a compreensão das consequências pluviométricas causadas pelas mudanças climáticas futuramente.

3.1.2. Mudanças climáticas e precipitação

Como diversos estudos apontam, as mudanças climáticas irão afetar os índices de precipitação, em alguns casos de forma a aumentar a intensidade das chuvas, e em outros de forma diminuir essa intensidade, dependendo da região. Sendo importante ressaltar que, em ambos os casos, essas alterações possuem consequências significativas para os ecossistemas, principalmente para a Amazônia (Silva, 2017). Com isso, é de extrema importância para este estudo tomar consciência sobre as previsões para os índices de precipitação decorrentes das mudanças climáticas de forma geral, a fim de entender futuramente como isso irá afetar o processo de respiração heterotrófica.

No caso do Brasil, a tendência mais citada nos estudos para a mudança nos índices pluviométricos é uma redução da precipitação durante os meses ditos “não chuvosos” (junho, julho e agosto), entretanto, os cenários também variam de acordo com biomas e as regiões do país (Lapola, 2007). Por exemplo, no Nordeste foram calculadas tendências positivas de chuva durante o segundo semestre do ano. Já nas regiões mais centrais do país houve uma certa divergência de resultados, apresentando tendências tanto positivas quanto negativas de precipitação e no Sudeste concluiu-se que, apesar de tendências positivas em algumas bacias hidrográficas, a região irá se tornar crítica em questão de recursos hídricos (Salviano et al., 2016). Sendo assim, pode-se perceber que há muita divergência nas análises e estimativas quanto aos índices de precipitação futuros e suas respostas às mudanças climáticas, principalmente devido às diferenças entre os biomas que correspondem a cada região do país.

Na Amazônia, os cenários apresentados são bem impactantes, considerando que é uma das regiões do Brasil que mais apresentou anomalias na precipitação (Lapola, 2007). A

princípio, na maioria dos estudos encontrados, observou-se uma tendência de redução na precipitação em diferentes áreas da Amazônia tanto nos períodos chuvosos quanto nos períodos mais secos (Rocha, 2019). Entretanto, após algumas pesquisas mais a fundo, foram encontrados estudos dizendo haver uma previsão de aumento nas quantidades de chuva no bioma amazônico em ambos os períodos do ano. Além disso, também existe a previsão de tendências positivas nos períodos chuvosos e tendências negativas nos períodos secos, como em (Salviano et al., 2016) e (Silva et al., 2016), o que também poderia gerar um grande impacto no ecossistema, por tornar esses períodos cada vez mais extremos.

Como dito anteriormente, há uma clara divergência nos estudos acerca de previsões de alteração nos índices pluviométricos para o bioma amazônico. O presente trabalho irá tratar de consequências em um cenário de diminuição da precipitação, conforme é esperado na maioria dos estudos, porém é necessário apontar que ainda há uma incerteza sobre as mudanças nos índices de precipitação, principalmente quando se trata de um bioma que percorre uma extensa área de ocupação.

3.1.3. Mudanças climáticas na Amazônia

As mudanças climáticas, como conhecemos, podem ser de origem antrópica, ou seja, consequência dos atos humanos, ou de causas naturais como o próprio ciclo solar, inclinação do planeta e alterações naturais do clima (Nações Unidas, 2023). Apesar dessas alterações no clima do planeta já serem previstas a algum tempo, é fato de que as ações antrópicas estão acelerando e intensificando cada vez mais esse fenômeno, tanto diretamente com desmatamentos ou indiretamente com a emissão de gases de efeito estufa, por exemplo (Nobre, 2007). Neste estudo, o principal foco será sobre as consequências das mudanças climáticas, mais especificamente sobre a diminuição de precipitação no bioma amazônico. Entretanto, é de extrema importância entender as causas dessas alterações e como elas afetam o bioma amazônico de forma geral.

Uma das principais mudanças observadas e previstas para a Amazônia é o aumento de temperatura, com uma previsão de aumento de mais 4°C até o final do século, segundo modelos de previsão baseados nas alterações já observadas desde o século XX (Marengo, 2013). A principal causa para esse aumento na temperatura é a emissão de gases de efeito estufa, que acabam retendo o calor das radiações solares na camada da atmosfera mais próxima da

superfície terrestre, a troposfera. Esse fenômeno sempre ocorreu de forma natural, mantendo o equilíbrio nas temperaturas do planeta e permitindo a vida como conhecemos, entretanto, com o crescimento das atividades humanas, principalmente após a revolução industrial, a emissão de gases por meio da queima de combustíveis fósseis tem sido muito mais intensa, o que acaba favorecendo a retenção de calor na atmosfera e aumentando as temperaturas tanto em ambientes terrestres quanto dos oceanos (WWF, s.d.).

A outra grande mudança prevista para a Amazônia é a alteração dos índices pluviométricos, fenômeno que apesar de ainda estar incerto sobre suas intensidades, com certeza irá afetar todo o ecossistema amazônico, como visto acima. Assim, ao juntar estes dois grandes fatores sendo alterados, percebe-se que os ecossistemas estão em situações cada vez mais agravantes de mudanças, o que pode trazer diversas consequências ecológicas. Atualmente, cientistas do Brasil e do mundo afirmam que o bioma amazônico já atingiu seu “tipping point”, ou seja, já se encontra em um ponto de alterações climáticas onde não há mais como o ecossistema se regenerar de forma autônoma e está constantemente sofrendo com aumento de temperaturas e secas mais prolongadas (Lovejoy; Nobre, 2019). Isso afetará de forma direta os ciclos da água e do carbono, além da ocorrência e sobrevivência de diversas espécies (Nobre, 2007).

3.1.4. Respiração heterotrófica na Amazônia

A respiração heterotrófica é parte de um processo comumente chamado de respiração do solo, que seria no caso a respiração autotrófica atuando em conjunto com a respiração heterotrófica (Ramos, 2010). Esse processo se dá pelo fluxo de CO₂ do solo para a atmosfera, é consequente da decomposição de matéria orgânica e faz parte dos diversos processos ecológicos que ocorrem nos ecossistemas, sendo de suma importância para o ciclo do carbono, uma vez que o solo é o maior reservatório de carbono em ecossistemas terrestres (Yue He, 2022).

O processo de respiração heterotrófica depende majoritariamente da umidade e da temperatura disponíveis no ambiente. Quando se trata de umidade, foi observado que quanto mais úmido o solo, maior é a atividade microbiana atuando nele, isso se dá pelo fato de que, conforme o solo se torna mais seco, os poros e a quantidade de água restante neles acabam se desconectando, não deixando assim, espaço para os nutrientes chegarem até os seres que

habitam aquele ambiente. Além disso, a circulação e absorção de oxigênio também acabam diminuindo em solos mais secos por ser uma substância mais facilmente difusa em água, dificultando a sobrevivência também de indivíduos não heterotróficos (Moyano, 2013).

Já quando se trata da temperatura, foi observado que a respiração heterotrófica é mais eficiente em ambientes mais quentes, isso pois a temperatura elevada faz com que o processo de decomposição acabe ocorrendo mais rápido e com que os organismos heterotróficos sejam mais estimulados, permitindo assim uma melhor absorção de nutrientes no solo e facilitando o processo de respiração (Zeeshan, 2021). Sabendo disso, é primordial o entendimento de como ocorrem estes processos em um ecossistema de floresta tropical úmida como a Amazônia.

Como já visto acima, a Amazônia é um tipo de floresta muito reconhecida por sua biodiversidade e sua umidade abundante, além de estar majoritariamente localizada na região equatorial, o que a torna uma região com temperaturas elevadas (Fisch et al., 1998). A partir disso e das informações presentes sobre os fatores que influenciam o processo de respiração heterotrófica, pode-se afirmar que a floresta amazônica é um ecossistema que apresenta grande quantidade deste processo de forma geral, devido a sua elevada temperatura média, que favorece a decomposição de matéria orgânica, e sua umidade na maior parte do ano, que aumenta a atividade microbiana e a absorção de oxigênio (Dias, 2006).

3.1.5 Mudanças climáticas e respiração heterotrófica

Como muitas previsões apontam, é certo que as mudanças climáticas irão causar um aumento constante na temperatura média do planeta (Nações Unidas Brasil, 2024), porém a questão da precipitação ainda é incerta. De acordo com o relatório do IPCC feito em 2014, as alterações nos índices pluviométricos são uma realidade no mundo todo, porém dependendo da região do planeta, elas poderão ser mais ou menos intensas que o comum. Esse cenário também se torna uma realidade dentro da própria Amazônia, como visto anteriormente. As diferentes características dentro de um mesmo bioma já são significativas o suficiente para afetar seus fatores de influência climática, fazendo com que os cenários de precipitação não sejam iguais dentro do bioma amazônico. Então, pode-se deduzir de que os índices de precipitação também terão diferentes previsões para o futuro.

Considerando isso, e o fato de que a temperatura e a umidade são os principais fatores que impulsionam a respiração heterotrófica (Yue He, 2022), é de extrema importância entender a relação entre as mudanças climáticas e esse processo de respiração. Principalmente, devido ao fato de que as florestas tropicais, em sua maioria, são consideradas sumidouros de carbono, onde apesar de ocorrer emissão de CO₂ através de processos como a decomposição e a respiração do solo em geral, o que está na atmosfera acaba sendo absorvido pela vegetação, criando assim um equilíbrio natural e uma capacidade de armazenamento desse composto (Ramos, 2010).

Assim, também é inevitável uma relação entre os processos de absorção de CO₂ pela vegetação e o processo de emissão de CO₂ através da respiração do solo, mais especificamente respiração heterotrófica. Fatores como esse e a constante publicação de estudos acerca das mudanças climáticas e as relações entre solo, umidade e temperatura, acabam tornando difícil uma previsão certa sobre como o processo de respiração heterotrófica vai responder às mudanças na temperatura e na umidade dos ecossistemas (Gomez-Casanovas, 2012). Entretanto, na maioria dos casos, já foi observado um aumento nas atividades microbianas do solo decorrente do aumento da temperatura (Mendes, 2017), o que significa que conforme a temperatura do planeta aumentar, como previsto até o final do século (Marengo, 2013), a tendência é aumentar a intensidade do processo de respiração heterotrófica, considerando apenas o fator temperatura.

Já quando se trata de precipitação, como visto anteriormente, ainda há muita incerteza acerca do aumento ou diminuição dos índices pluviométricos, sendo de extrema importância também considerar as diferentes regiões do planeta e dos próprios biomas (Lapola, 2007). Entretanto, como será trabalhado uma previsão para índices reduzidos de precipitação neste estudo, o foco aqui será analisar os estudos que já abordam as possíveis respostas do processo de respiração heterotrófica sobre a diminuição da precipitação.

3.1.6. Precipitação e respiração heterotrófica

Segundo a maioria dos estudos, as taxas de respiração heterotrófica têm uma tendência a aumentar em períodos mais úmidos ou com maior índice de precipitação (Veeck, 2018) e (Song, 2020). Isso se dá pelo fato de que, a maior concentração de água influencia positivamente a atividade microbiana e, por consequência, a absorção e fluxo de oxigênio no

solo, como visto anteriormente (Moyano, 2013), fazendo com que seja liberado uma maior quantidade de CO₂ na atmosfera. Entretanto, as taxas de respiração heterotrófica possuem uma umidade “ideal” para atingirem seu máximo, pois estudos como o de Gliński et al. (1985) também mostram que a umidade excessiva do solo pode causar uma inibição na emissão de CO₂, devido ao impedimento do fluxo de oxigênio no solo.

Outro fator considerado limitante para a emissão de CO₂ seria a temperatura, uma vez que temperaturas mais baixas ou extremamente altas não permitem um grande fluxo de CO₂. Assim como o fator de precipitação, existe uma temperatura “ideal” onde o fluxo de carbono no solo é maior, isso pode ser observado, por exemplo, ao compararmos ecossistemas temperados do hemisfério norte, com ecossistemas tropicais do hemisfério sul, nesse caso é observado um maior fluxo de CO₂ em sistemas tropicais, justamente por possuírem altos níveis de pluviosidade juntamente a uma temperatura média ótima para a ação de microrganismos no solo (Ramos, 2010). Outro estudo que pode servir de exemplo para essa situação é o de Sotta et al. (2007) realizado na Amazônia, onde os resultados mostraram uma diminuição no fluxo de CO₂ ao final do período chuvoso (solo altamente úmido) e um aumento no fluxo durante o início do período de seca (umidade mais amena e próxima do “ideal”).

Sabendo disso e considerando o fato de que as variações de temperatura são pequenas em áreas equatoriais, como a floresta amazônica, pode-se dizer que o fator umidade acaba sendo muito mais influente para a respiração do solo e o fluxo de CO₂ do que o fator temperatura, uma vez que sua variação ao longo do ano acaba não sendo muito expressiva (Dias, 2006).

Assim, a partir das previsões de uma redução nos índices de precipitação, devido às mudanças climáticas, e dos estudos já existentes acerca da relação entre a respiração heterotrófica e a precipitação/umidade na Amazônia, é possível deduzir que provavelmente grande parte do bioma amazônico sofrerá com uma diminuição nas taxas de respiração do solo nos próximos anos, o que poderá ter efeito significativo no ciclo do carbono dentro do ecossistema.

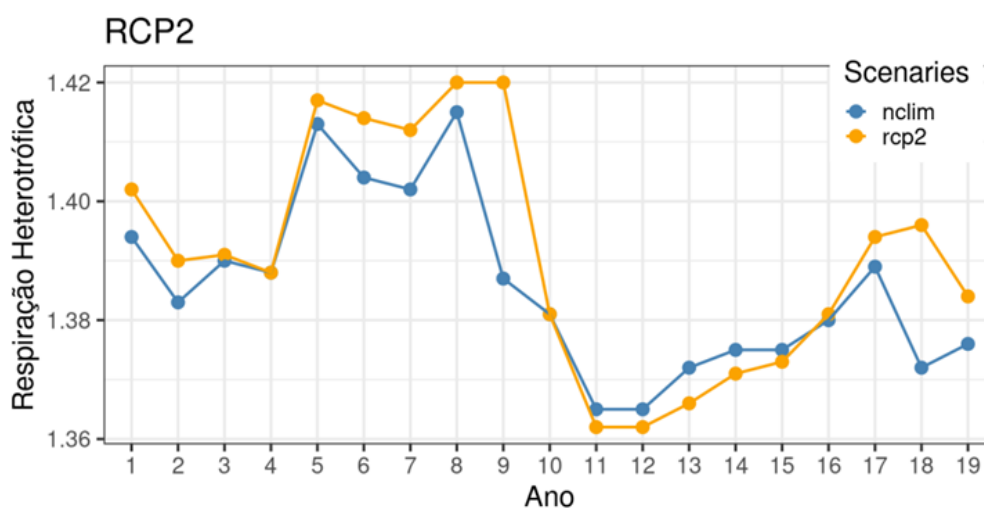
3.2 Dados gerados no modelo

A partir dos dados gerados através do modelo CAETÊ, obteve-se dados sobre as taxas de respiração heterotrófica correspondentes a 38 anos consecutivos, de 1979 até 2016, que foram trabalhados de forma bianual, ou seja, cada arquivo correspondendo a dois anos de dados climáticos, dessa forma seria possível obter os resultados através de um número menor de dados, facilitando o entendimento e a visualização. Consequentemente, foram computados 19 arquivos de dados para trabalhar nos 4 cenários diferentes: nclim, RCP2, RCP6 e RCP8.

Cada arquivo corresponde a um conjunto de células de grade da região escolhida para o estudo (região central da Amazônia), mais especificamente 66 células, que posteriormente foram agrupadas em uma média bianual para cada cenário. A partir das médias bianuais, foi feita uma análise através de gráficos de linha, comparando o cenário sem alterações na precipitação (nclim) com os outros cenários contendo as alterações (RCP2, RCP6, RCP8).

Para o cenário otimista (RCP2), obteve-se o seguinte resultado:

Figura 2 - Médias bianuais de respiração heterotrófica comparando os cenários nclim e RCP2.



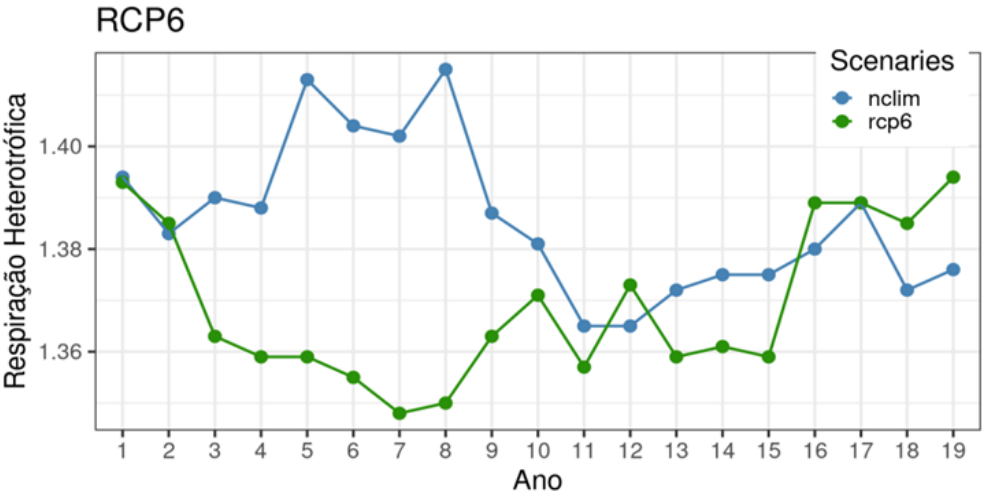
Fonte: Isabela Lopes, 2024.

Onde o eixo X representa os anos agrupados de forma bianual e o eixo Y os valores de média da respiração heterotrófica para cada ano. Nesse cenário foi observado, de forma geral, previsões consideravelmente parecidas entre os dois cenários em comparação, onde as taxas de respiração aumentam entre os anos 5 e 9 (1987 a 1996) e logo após, sofreram uma queda abrupta entre os anos 9 e 12 (1996 a 2002). A única diferença significativa entre os cenários nclim e

RCP2 pode ser vista no ano 18, onde o cenário sem alterações na precipitação obteve uma taxa de respiração heterotrófica mais baixa do que o cenário com alterações.

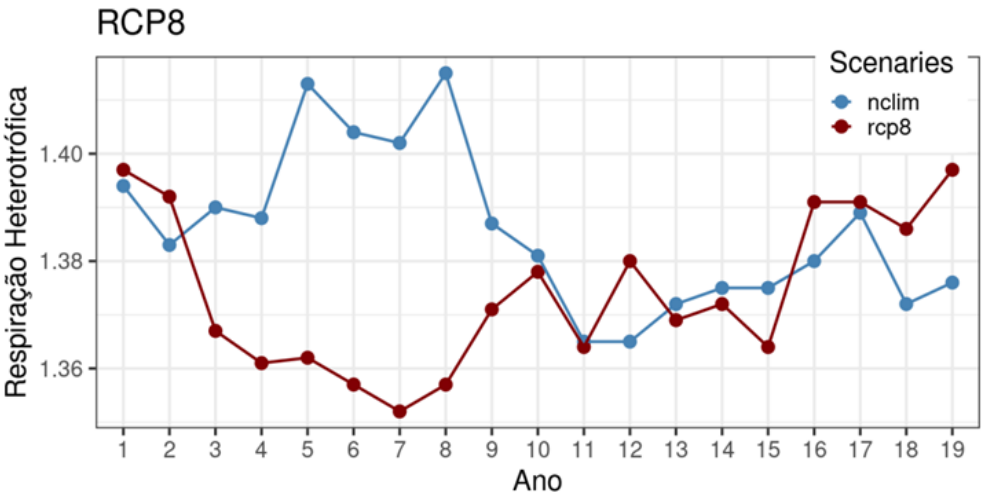
Já para os cenários intermediário (RCP6) e pessimista (RCP8), os resultados se mostraram mais parecidos entre si, do que em comparação com o cenário sem alteração:

Figura 3 - Médias bianuais de respiração heterotrófica comparando os cenários nclim e RCP6.



Fonte: Isabela Lopes, 2024.

Figura 4 - Médias bianuais de respiração heterotrófica comparando os cenários nclim e RCP8.



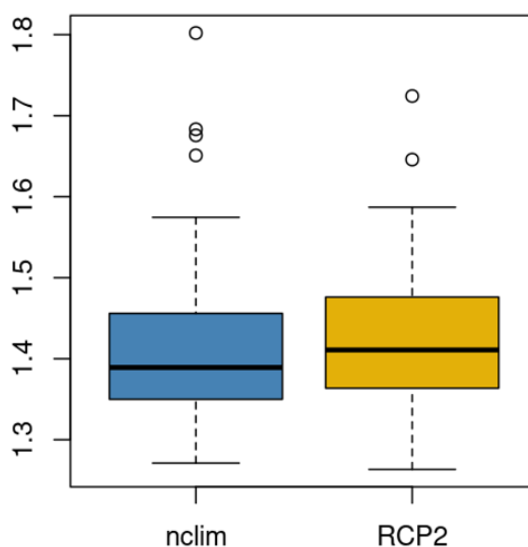
Fonte: Isabela Lopes, 2024.

Apesar de parecerem, de forma geral, bem parecidos, pode-se observar uma diferença entre os gráficos durante o período dos anos 8 e 15, onde para o cenário intermediário (RCP6), as médias das taxas de respiração foram levemente mais baixas do que para o cenário pessimista (RCP8).

Considerando cada cenário separadamente, há uma grande diferença entre os valores de respiração heterotrófica no cenário sem alteração (nclim) e nos cenários RCP6 e RCP8, entre os anos 3 e 9 as taxas de respiração foram mais baixas para ambos os cenários alterados em comparação com o nclim. Além disso, percebe-se que entre os anos 11 e 19, os valores de respiração mantêm uma certa constância para o cenário sem alteração, diferentemente dos outros cenários alterados, onde as taxas acabam variando mais ao longo desses anos.

Além dos dados de comparação entre as médias bianuais, para uma análise mais aprofundada, foram gerados gráficos boxplot comparativos incluindo a média de valores da respiração heterotrófica nos anos de 2015-2016 para cada cenário em comparação com o cenário base nclim, assim pode-se observar as alterações em um cenário mais próximo ao que vivemos atualmente. Para o cenário RCP2 obteve-se uma média de respiração levemente maior do que o cenário sem alterações, mas uma distribuição geral dos valores extremamente parecida, com exceção apenas de alguns outliers (valores discrepantes), como pode ser observado na Figura 5.

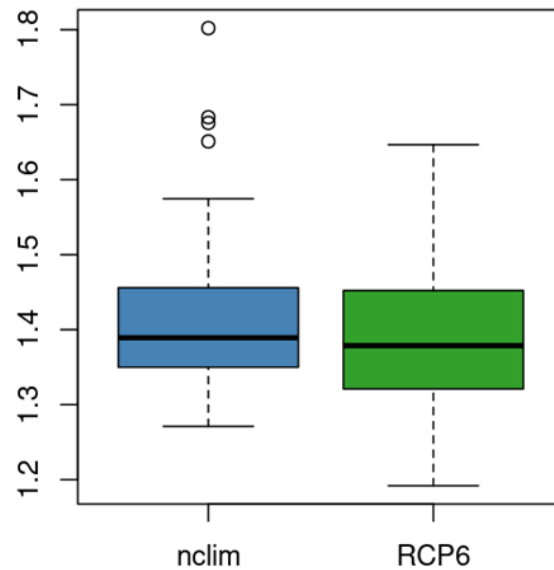
Figura 5 - Boxplot comparativo entre as taxas de respiração heterotrófica para os cenários nclim e RCP2 durante os anos 2015-2016.



Fonte: Isabela Lopes, 2024.

O cenário RCP6, por sua vez, mostra resultados já bem distintos do RCP2, como visto também nas Figuras 2 e 3, porém neste gráfico, o resultado mostra uma média geral menor do que o nclim e também valores menos discrepantes, que podem ser observados na falta e outliers, entretanto seus limites máximo e mínimo acabaram sendo mais expressivos.

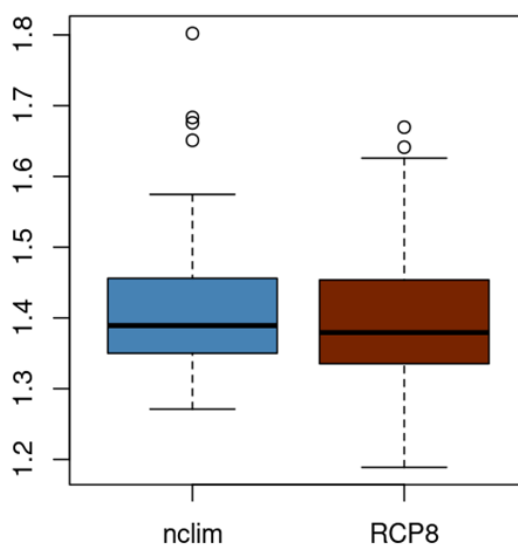
Figura 6 - Boxplot comparativo entre as taxas de respiração heterotrófica para os cenários nclim e RCP6 durante os anos 2015-2016.



Fonte: Isabela Lopes, 2024.

Já para o cenário pessimista, obteve-se uma média bastante parecida com o RCP6, entretanto o cenário pessimista contou com mais valores discrepantes.

Figura 7 - Boxplot comparativo entre as taxas de respiração heterotrófica para os cenários nclim e RCP8 durante os anos 2015-2016.



Fonte: Isabela Lopes, 2024

4. DISCUSSÃO

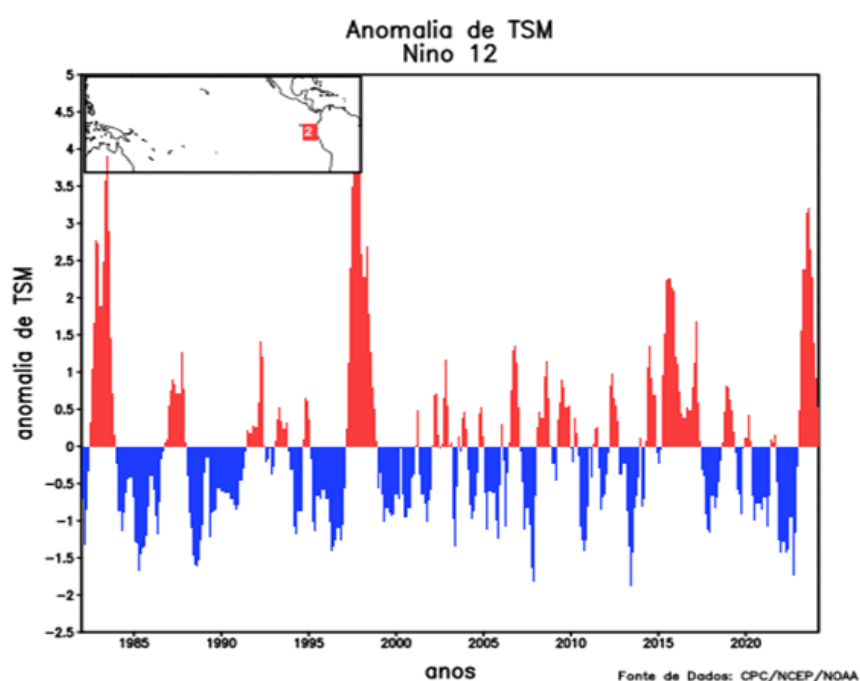
Considerando que as mudanças climáticas irão afetar significativamente os índices pluviométricos no mundo todo, inclusive na Amazônia, pode-se observar, através da literatura, que a maioria das previsões correspondem a uma diminuição nas taxas de pluviosidade para a região central da Amazônia.

Com isso, o esperado para este estudo seria uma diminuição nas taxas de respiração heterotrófica de forma geral, para todos os cenários. Pois, ao ter uma precipitação reduzida, consequentemente a disponibilidade de água no solo também reduz, afetando negativamente todo o processo de decomposição das matérias orgânicas e respiração do solo. Isso acontece porque os microrganismos têm sua atividade diminuída em ambientes mais secos, como visto anteriormente. Porém, isso acabou não sendo uma realidade ao extrair os resultados do modelo CAETÊ.

Observando os gráficos de média bianual, obtidos a partir do modelo com base nos dados do IPCC, percebe-se que o cenário sem alterações na precipitação (nclim) variou, aproximadamente, entre os valores $1.36 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ e $1.41 \text{ g m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ para as taxas de respiração heterotrófica. Esses valores foram distribuídos de forma irregular ao longo dos anos,

ou seja, não seguiram uma constância crescente ou decrescente, contrariando o que era esperado anteriormente no estudo. Isso pode ser explicado pelo fato de que a respiração heterotrófica é influenciada por outros fatores climáticos, além da precipitação e umidade do solo, assim essas variações podem acabar correspondendo a eventuais fenômenos climáticos que ocorreram ao longo dos anos, como alterações consequentes do El Niño e La Niña, por exemplo. Outro fato interessante sobre este cenário, é a queda na taxa de respiração, que ocorre a partir do ano 8, ou seja 1993-1994, que acaba fazendo sentido se compararmos as taxas de respiração heterotrófica dessa época com os eventos de El Niño e La Niña correspondentes.

Figura 8: Eventos El Niño e La Niña ao longo dos anos.



Fonte: INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), 2016.

Observando o gráfico de registros dos fenômenos climáticos (Figura 8), pode-se perceber que a queda nas taxas de respiração heterotróficas para o cenário sem alteração possivelmente está relacionado a oscilação entre La Niña e El Niño entre os anos de 1995 e 2000, onde após um período de intensidade do fenômeno La Niña, tivemos um grande pico de anomalia aproximadamente em 1998, referente ao El Niño, causando secas severas na Amazônia (Borma et al., 2013) e, consequentemente, uma diminuição na taxa de respiração heterotrófica.

Ao observar o gráfico de média bianual para o cenário otimista (RCP2), que representa uma diminuição de -3.9% da precipitação anual, entende-se que as taxas de respiração

heterotrófica variaram entre $1.42\text{g m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ e $1.36\text{g m}^{-2}\text{ day}^{-1}$, bem similar ao cenário sem alterações, porém com algumas pequenas diferenças. A primeira perceptível através do gráfico, é o fato de que para o cenário RCP2, apesar dos pontos e linhas seguirem as mesmas direções que o nclim, elas acabam sendo um pouco mais expressivas tanto positivamente quanto negativamente. Isso ocorre devido ao fato de que, para este cenário, houve uma redução na precipitação, que mesmo sendo otimista, já expressou alguma diferença nas taxas de respiração heterotrófica. Esse fato pode ser observado também, ao compararmos os boxplots na Figura 5, no qual a mediana para RCP2 se mostrou levemente maior do que para nclim. Uma possível explicação para isso seria a influência dos fatores temperatura e precipitação atuando em conjunto no processo de respiração heterotrófica, pois como dito anteriormente, segundo estudos como o de Gliński et al. (1985), existe uma umidade e temperatura “ideal” onde as taxas de respiração tendem a aumentar, o que pode ser o caso deste cenário. Assim, apesar da diminuição da precipitação, houve um leve aumento nas taxas de respiração heterotrófica.

Já para os cenários RCP6 e RCP8 os resultados foram bem diferentes do RCP2. Para o cenário considerado intermediário (RCP6), onde houve uma redução de -5,8% na precipitação, percebe-se uma diferença bastante expressiva ao compará-lo com o cenário base nclim. As taxas de respiração variaram aproximadamente entre $1,39\text{g m}^{-2}\text{ day}^{-1}$ e $1,35\text{g m}^{-2}\text{ day}^{-1}$, o que já mostra uma diminuição em relação ao cenário anterior. Neste caso, como a diminuição da precipitação já é mais significativa, os resultados acabaram expressando uma diminuição na taxa de respiração heterotrófica de forma geral, como se pode observar através da figura 6, onde a mediana do boxplot RCP6 se encontra mais abaixo do que o cenário nclim. Entretanto, este cenário também acabou mostrando uma inconsistência, pois até o ano 7 pode-se observar uma tendência negativa nas taxas de respiração, porém com o passar do tempo essa tendência acabou se tornando positiva próximo aos anos de 2015 e 2016 (Figura 3), o que também pode estar relacionado a eventuais fenômenos ou alterações climáticas ao decorrer desses anos.

No cenário RCP8, considerando uma redução de -14,8%, obteve-se um cenário semelhante ao RCP6, como é possível observar nas Figuras 3 e 4. Esse resultado pode indicar uma alta significância para as taxas de respiração heterotrófica em cenários intermediários, ou seja, o impacto negativo pode ser observado apenas a partir do cenário intermediário (RCP6) e, mesmo com uma constante redução na precipitação, a alteração nessas taxas permaneceu similar. Assim, provavelmente há um “limite” onde as taxas de respiração heterotrófica respondem de forma mais expressiva a redução na precipitação, que seria o caso do RCP6. Isso

também pode comprovar que há um limite de temperatura e umidade ideal que afetam as taxas de respiração heterotrófica no ecossistema.

De forma geral, pode-se observar que houve de fato uma diminuição na taxa de respiração heterotrófica, conforme a diminuição da precipitação, porém os resultados acabaram não sendo tão expressivos e significativos. Isso indica, mais uma vez, que a respiração heterotrófica é um processo que depende de muitos fatores para funcionar em um ecossistema, e talvez por esse motivo, alterar somente a variável da precipitação não cause um efeito tão negativo em um futuro próximo. Outro fator também importante de ser considerado, é a área de estudo (região central da Amazônia) e a variação anual de temperatura e precipitação, uma vez que as taxas também podem variar significativamente conforme as estações do ano (Bossan, 2017; Sotta, 1998). Nesses estudos, por exemplo, foi observado que a alta umidade e alta temperatura do solo podem agir de diferentes maneiras na respiração heterotrófica, levando à conclusão de que reduzir a temperatura e a umidade separadamente, não significa uma redução nas taxas de respiração necessariamente, fato que pode explicar a baixa significância dos resultados apresentados neste estudo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos, juntamente com o levantamento de dados na literatura, percebe-se uma relação direta entre o fator precipitação e o processo de respiração heterotrófica, mas que neste estudo especificamente, essa relação não se mostrou tão significativa quanto esperado. Com isso, pode-se entender que a redução na precipitação, prevista para os próximos anos na região central da Amazônia, pode sim afetar o processo de respiração heterotrófica de forma negativa, mas que somente esse fator não seria suficiente para apresentar uma grande diferença, uma vez que o processo de respiração envolve diversas outras variáveis que também irão alterar com o tempo e as mudanças climáticas, como a temperatura por exemplo.

Sabendo do cenário atual das mudanças climáticas, apesar dos resultados apresentados neste estudo, é de suma importância estudar os impactos de todas essas alterações no clima sobre a respiração heterotrófica, pois além de ser um processo extremamente importante para o funcionamento do ecossistema, movimentando o fluxo de carbono, também pode representar um aumento ou diminuição nas taxas de CO₂ emitidas na atmosfera, somando informações para diversos estudos acerca das emissões deste gás e seus impactos no planeta.

Assim, é indicado que futuros estudos usem da mesma metodologia, porém considerem alterar a variável temperatura junto a precipitação, conforme as alterações climáticas já previstas para os próximos anos. Com isso, será possível observar um resultado mais preciso sobre a alteração nas taxas de respiração heterotrófica para a região central da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- BONAL, Damien *et al.* The response of tropical rainforests to drought-lessons from recent research and future prospects. **Annals of Forest Science**, v. 73, p. 27-44, 2016. DOI 10.1007/s13595-015-0522-5. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/282253627_The_response_of_tropical_rainforests_to_o_drought-lessons_from_recent_research_and_future_prospects. Acesso em: 14 abr. 2024.
- BORMA, Laura de Simone. **Impactos dos eventos extremos de seca e cheia sobre os recursos hídricos amazônicos e ações da Defesa Civil**. In: SECAS na Amazônia: Causas e Consequências. 2013. p. 305-337. Disponível em: <https://www.ccst.inpe.br/publicacao/impactos-dos-eventos-extremos-de-seca-e-cheia-sobre-os-recursos-hidricos-amazonicos-e-aco-es-da-defesa-civil-in-borma-l-s-nobre-c-a-ed/>. Acesso em: 1 jul. 2024.
- BOSSAN, Vitor Potenza. **Avaliação do ciclo do carbono em ecossistemas de pastagens tropicais em cenário futuro de mudanças climáticas**. 2017. Dissertação (Mestrado em Biologia Comparada) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2017. doi:10.11606/D.59.2018.tde-02012018-105554. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/59/59139/tde-02012018-105554/pt-br.php>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- CARDELI, Bárbara Rocha. Modelagem de competição por luz e atributos funcionais de plantas sob aumento de [CO₂] na Floresta Amazônica. 2021. Dissertação de mestrado (Mestra em Ecologia e Biodiversidade) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), [S. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/f8471124-478d-4beb-bb00-e92250b234da>. Acesso em: 1 jul. 2024.
- CAREY, Joanna C. *et al.* Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming. **PNAS - Self-Pollination and flower evolution**, v. 113, ed. 48, p. 72-88, 2016. DOI <https://doi.org/10.1073/pnas.1605365113>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.1605365113>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- CASTANHO, Camilla. **Fatores determinantes no processo de decomposição em florestas no Estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Ciências, área: Biologia comparada) - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2005.
- CHAMBERS, Jeffrey Q. *et al.* Respiration from a tropical forest ecosystem: Partitioning of sources and low carbon use efficiency. **Ecological Applications**, v. 14, p. 72-88, 2004. DOI 10.1890/01-6012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/40112826_Respiration_from_a_tropical_forest_eco_system_Partitioning_of_sources_and_low_carbon_use_efficiency. Acesso em: 14 abr 2024.
- Condições atuais do Enos: Caracterização do El-Niño. CPTEC-INPE. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- COUTINHO, Elaine de Castro *et al.* Variabilidade climática de precipitação na bacia amazonica brasileira entre 1982 e 2012. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v22i0.46074>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/46074/35466>. Acesso em: 14 abr. 2024.

DIAS, Jadson Dezincourt. **Fluxo do CO₂ proveniente da respiração do solo em áreas de floresta nativa da Amazônia**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) - Ecologia de Agroecossistemas, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006. doi:10.11606/D.91.2006.tde-04102006-163445. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-04102006-163445/pt-br.php>. Acesso em: 07 abr 2024.

FERRAZ, Isolde Dorothea Kossmann *et al.* Características básicas para um agrupamento ecológico preliminar de espécies madeireiras da floresta de terra firme da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 34, p. 621 - 633, 2004. DOI <https://doi.org/10.1590/S0044-59672004000400014>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/RtrmcwTMTxvtz4t5LWZyz3d/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 abr. 2024.

FISCH, Gilberto; MARENGO, José A.; NOBRE, Carlos A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **ACTA Amazonica**, v. 28, ed. 2, p. 101-126, 1998. DOI <https://doi.org/10.1590/1809-43921998282126>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/NVRbNSn7P5z4hjtFNmMjLjx/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 abr. 2024.

FREIRE, Julliana Larise Mendonça; LIMA, Jeane Rafaela Araújo; CAVALCANTI, Enilson Palmeira. Análise de Aspectos Meteorológicos sobre o Nordeste do Brasil em Anos de El Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [s. l.], v. 3, p. 429-444, 2011. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/download/232719/26725>. Acesso em: 1 jul. 2024.

GALVÃO, Manoella Souza. **Dinâmica espacial e sazonal da composição isotópica do CO₂ respirado pelos solos de uma Floresta Primária na Amazônia Central**. 2005. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências Agrárias) - Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, Amazonas, 2005. Disponível em: https://repositorio.inpa.gov.br/bitstream/1/5124/1/Manoella_Galvao.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

GLIŃSKI, J.; STEPNIEWSKI, W. *In: SOIL Aeration and Its Role for Plants*. 1985. p. 191-218. Disponível em: <https://www.sidalc.net/search/Record/unfao:616417/Description>. Acesso em: 1 jul. 2024.

GOMES-CASANOVAS, Nuria *et al.* Net ecosystem exchange modifies the relationship between the autotrophic and heterotrophic components of soil respiration with abiotic factors in prairie grasslands. **Global Change Biology**, Estados Unidos, p. 2532–2545, 2012. DOI doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02721.x. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1365-2486.2012.02721.x>. Acesso em: 14 abr. 2024.

HISANO, Masumi; SEARLE, Eric B.; CHEN, Han Y. H. Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems. **Biological Reveiws**, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/brv.12351>. Acesso em: 1 jul. 2024.

JONES, Nicola. Rare ‘triple’ La Niña climate event looks likely — what does the future hold?. **Nature**, 2022. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/d41586-022-01668-1>. Acesso em: 1 jul. 2024.

LAPOLA, David Montenegro. **Consequências das mudanças climáticas globais nos biomas da América do Sul: um modelo de vegetação potencial incluindo ciclo de carbono**. 2007. Dissertação de mestrado (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/04.25.18.15/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2024.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação na bacia amazônica e sua associação à variabilidade da temperatura da superfície dos oceanos Pacífico e Atlântico: uma revisão. **Geosp – Espaço e Tempo (Online)**, v. 20, n. 3, p. 657-675, mês. 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2014.84539>. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geosp/issue/view/6465>. Acesso em: 14 abr. 2024.

LLOPART, Marta *et al.* **Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins**, 2014. DOI 10.1007/s10584-014-1140-1. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/262487615_Climate_Change_Impact_on_Precipitation_for_the_Amazon_and_La_Plata_basins. Acesso em: 14 abr. 2024.

LOVEJOY, Thomas E.; NOBRE, Carlos. Amazon tipping point: Last chance for action. **Science Advances**, v. 5, 2019. DOI <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2949>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/sciadv.aba2949>. Acesso em: 26 abr. 2024.

MALHI, Yadvinder *et al.* Produção, Estoques e Fluxo de Carbono nas Florestas Amazônicas. **Amazonia and Global Change Geophysical Monograph Series 186**, Estados Unidos, p. 355-371, 2009. DOI 10.1029/2008GM000779. Disponível em: https://daac.ornl.gov/LBA/lbaconferencia/amazonia_global_change/22_Producao_Estoques_Malhi.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

MARENGO, José A. *et al.* Prefácio. **Secas na Amazônia: Causas e Consequências**, p. 9-11, 2013. Disponível em: https://s3-sa-east-1.amazonaws.com/ofitexto.arquivos/degustacao/secas-na-amazonia-causas-e-consequencias_deg.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

Master: Meteorologia aplicada a sistemas de tempo regionais. 2010. Disponível em: <http://master.iag.usp.br/pr/ensino/sinotica/aula15/>. Acesso em: 14 abr. 2024.

MENDES, Rodrigo; TAKETANI, Natália Franco; TAKETANI, Rodrigo Gouvêa. Efeito do aquecimento global sobre a comunidade microbiana do solo. **Aquecimento Global e Problemas Fitossanitários**, Brasília, ed. 1, p. 177-203, 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1087839/1/2017CL10.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2024.

MOTTA, Alline Zagnoli Villela. **Influência dos fatores ambientais na altura das árvores emergentes na Amazônia brasileira**. 2020. Dissertação de mestrado (Mestre em Ciência Florestal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2020. Disponível em:

http://acervo.ufvjm.edu.br/jspui/bitstream/1/2463/1/alline_zagnoli_villela_motta.pdf. Acesso em: 1 jul. 2024.

MOYANO, Fernando E.; MANZONI, Stefano; CHENU, Claire. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models. **Soil Biology & Biochemistry**, França, v. 59, p. 72-85, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/256854113_Responses_of_soil_heterotrophic_respiration_to_moisture_availability_An_exploration_of_processes_and_models. Acesso em: 14 abr. 2024.

NOBRE, Carlos A.; NOBRE, Antônio D. O balanço de carbono da Amazônia brasileira. **Estudos Avançados**, São Paulo, Brasil, v. 16, n. 45, p. 81-90, 2002. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/9870>. Acesso em: 26 abr. 2024.

NOBRE, Carlos A; SAMPAIO, Gilvan; SALAZAR, Luis. Mudanças climáticas e Amazônia. **Cienc. Cult**, São Paulo, v. 59, n. 3, p. 22-27, 2007. Disponível em: http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252007000300012&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 14 abr. 2024.

OLIVEIRA, Arlem Nascimento de; AMARAL, Iêda Leão do. Florística e fitossociologia de uma floresta de vertente na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 34, p. 21- 34, 2004. DOI <https://doi.org/10.1590/S0044-59672004000100004>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aa/a/MTgGdvZmwFDMn7PPhSjYzKk/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 26 abr. 2024.

OLIVEIRA, Elton Souza; REATTO, Adriana; ROIG, Henrique Llacer. Estoques de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 32, p. 71-93, 2015. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/138868/1/Estoques-de-carbono-do-solo.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2024.

O que são mudanças climáticas?. In: **Nações Unidas Brasil**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/175180-o-que-s%C3%A3o-mudan%C3%A7as-clim%C3%A1ticas>. Acesso em: 14 br. 2024.

PORTELA, Bruno Takeshi Tanaka. **Efeitos da seca sobre os estoques de carbono no solo e suas frações em um experimento de exclusão de chuva na Amazônia**. 2013. Dissertação de mestrado (Mestre em Clima e Ambiente) - Universidade do Estado do Amazonas (UEA), Manaus, Amazonas, 2013. Disponível em: https://repositorio.inpa.gov.br/bitstream/1/12971/1/Tese_Bruno%20Takeshi%20Tanaka%20Portela.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

P. Meir *et al.* The fate of assimilated carbon during drought: impacts on respiration in Amazon rainforests. **Philosophical Transactions of The Royal Society**, v. 363, p. 1849 - 1855, 2008. DOI 10.1098/rstb.2007.0021. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstb.2007.0021>. Acesso em: 14 abr. 2024.

PESQUERO, José Fernando *et al.* Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Climate Dynamics**, v. 38, ed. 3, p. 635-653, 2011. DOI 10.1007/s00704-009-0123-z. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/225146625_Downscaling_of_South_America_present_climate_driven_by_4-member_HadCM3_runs. Acesso em: 14 abr. 2024.

RAMOS, Alzira. **Estudo dos factores que influenciam a respiração do solo de um montado de sobro**. 2010. Dissertação de mestrado (Mestrado em engenharia florestal e dos recursos naturais) - Universidade técnica de Lisboa. Disponível em: https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/2526/1/dissertacao_mestrado_agr2010.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

RIUS, Bianca Fazio; FILHO, João Paulo Darela; FLEISCHER, Katrin; HOFHANSL, Florian; BLANCO, Carolina Casagrande; RAMMING, Anja; DOMINGUES, Tomas Ferreira; LAPOLA, David Montenegro. Higher functional diversity improves modeling of Amazon forest carbon storage. **Ecological Modelling**, [s. l.], n. 481, 2023. Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2023/05/pesquisa-unicamp-caete.pdf>. Acesso em: 1 jul. 2024.

ROCHA, Vinícius Machado; CORREIA, Francis Wagner Silva; GOMES, Wesley de Brito. Eta-HadGEM2-ES. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Manaus, v. 12, n. 6, p. 2051-2065, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338962548_Avaliacao_dos_Impactos_da_Mudanca_do_Clima_na_Precipitacao_da_Amazonia_Utilizando_o_Modelo_RCP_85_Eta-HadGEM2-ES. Acesso em: 14 abr. 2024.

ROCHA, Vinícius Machado *et al.* Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: O Papel do Transporte de Umidade e da Evapotranspiração da Superfície. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, ed. 3, p. 387-398, 2017. DOI <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863230006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/53XZYdjvScP4gpVGZ3mp34k/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 abr. 2024.

SALIMON, Cleber Ibraim. **Respiração do solo sob florestas e pastagens na Amazônia Sul-Ocidental, Acre**. 2003. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. doi:10.11606/T.64.2003.tde-02062003-092035. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/64/64132/tde-02062003-092035/publico/tesecleber.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2024.

SALVIANO, Marcos Figueiredo; GROPPPO, Juliano Daniel; PALLEGRINO, Giampaolo Queiroz. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasil, v. 31, p. 64-73, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/299590111_Analise_de_Tendencias_em_Dados_de_Precipitacao_e_Temperatura_no_Brasil. Acesso em: 14 abr. 2024.

SILVA, Fabrício Brito *et al.* Evidências de Mudanças Climáticas na Região de Transição Amazônia-Cerrado no Estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasil, v. 31, p. 330-336, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/R6KJ69nmX3y9B9X6bRVMzhH/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 14 abr. 2024.

SILVA, Roberto Omena Barbosa da; MONTENEGRO, Suzana Maria Gico Lima; SOUZA, Weronica Meira de. Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco. **Eng Sanit Ambient**, Brasil, v. 22, n. 3, p.

579-589, 2017. DOI 10.1590/S1413-41522017142481. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/m3J5NGQFR74yd6ZgFtbZ8rF/>. Acesso em: 14 abr. 2024.

SILVA, Vinícius Duncan. **Respiração heterotrófica e estoques de necromassa em regiões de borda e interior em fragmentos de Mata Atlântica**. 2013. Dissertação de mestrado (Mestre em Ecologia e Recursos Naturais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2013. Disponível em: https://s3-sa-ehttps://uenf.br/posgraduacao/ecologia-recursosnaturais/wp-content/uploads/sites/7/2013/10/Vinicius-Duncan-Silva-PPGERN.pdfast-1.amazonaws.com/ofitexto.arquivos/degustacao/secas-na-amazonia-causas-e-consequencias_deg.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

SONG, Huanhuan; YAN, Tao; WANG, & Jinsong; SUN, Zhenzhong. Precipitation variability drives the reduction of total soil respiration and heterotrophic respiration in response to nitrogen addition in a temperate forest plantation. **Biology and Fertility of Soils**, Alemanha, n. 56, 2020. DOI 10.1007/s00374-019-01417-z. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/344244176_Precipitation_variability_drives_the_reduction_of_total_soil_respiration_and_heterotrophic_respiration_in_response_to_nitrogen_addition_in_a_temperate_forest_plantation. Acesso em: 14 abr. 2024.

SOTTA, Eleneide Doff. **Fluxo de CO₂ entre solo e atmosfera em floresta tropical úmida da Amazônia Central**. Orientador: Dr. Niro Higuchi. 1998. Tese de mestrado (Mestre em Ciências Biológicas) - Universidade do Amazonas - UA, Manaus, Amazonas, 1998. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/5420>. Acesso em: 26 abr. 2024.

SOTTA, Eleneide; VELDKAMP, Edzo; SCHWENDENMANN, Luitgard; GUIMARÃES, Brenda. Effects of an induced drought on soil carbon dioxide (CO₂) efflux and soil CO₂ production in an Eastern Amazonian rainforest, Brazil. **Global Change Biology**, v. 13, p. 2218-2229, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2486.2007.01416.x>. Acesso em: 14 abr. 2024.

SOUSA, Adriano Marlison Leão de *et al.* Variabilidade espaço-temporal da precipitação na Amazônia durante eventos enos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, ed. 1, p. 015-029, 2015. DOI <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.1.p013-024>. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Paulo-Souza-48/publication/290607886_Variabilidade_espaco-temporal_da_precipitacao_na_Amazonia_durante_eventos_enos/links/569af03108ae748dfb0b8bad/Variabilidade-espaco-temporal-da-precipitacao-na-Amazonia-durante-eventos-enos.pdf. Acesso em: 14 abr. 2024.

SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Padrões Climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v21i0.41232. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/13989>. Acesso em: 7 abr. 2024.

SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Precipitação sazonal sobre a Amazônia oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o RegCM3. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 111-124, jun. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v24n2/v24n2a01.pdf>. Acesso em: 7 abr. 2024.

Temperatura média global tem 50% de chance de exceder 1,5°C até 2026. *In: Nações Unidas Brasil*. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/181236-temperatura-m%C3%A9dia-global->

tem-50-de-chance-de-exceder-15%C2%B0c-at%C3%A9-2026#:~:text=De%20acordo%20com%20os%20novos,%2C%20saltou%20para%20quase%2050%25. Acesso em: 14 abr. 2024.

TOLEDO, Lígia Cristina. **Efeito da umidade na respiração de serrapilheira grossa e fina em uma floresta tropical de terra-firme da Amazônia Central**. 2002. Dissertação de Mestrado (Mestre em Ciências Agrárias) - Universidade do Amazonas - UA, Manaus, Amazonas, 2002. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/5201>. Acesso em: 14 abr. 2024.

VEECK, Gustavo; TEICHRIEB, Claudio; DIAZ, Marcelo; BREMM, Tiago. Análise preliminar da relação entre emissão de CO₂ do solo e do ecossistema em um agroecossistema do sul do Brasil. **Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas**, Rio Grande do Sul, p. 251-256, 2018. DOI:10.5902/2179460X30897. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329481222_Analise_preliminar_da_relacao_entre_e_missao_de_CO2_do_solo_e_do_ecossistema_em_um_agroecossistema_do_sul_do_Brasil. Acesso em: 14 abr. 2024.

VILLÉGER, Sébastien; MASON, Norman W. H.; MOUILLOT, David. New multidimensional functional diversity indices for a multifaceted framework in functional ecology. **Ecological Society of America**, v. 89, n. 8, p. 2290-2301, 2008. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18724739/>. Acesso em: 1 jul. 2024.

YUE HE, DING, Jinzhi. Overestimation of global soil heterotrophic respiration. **Elsevier**, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Yue_He51/publication/354581032_Overestimation_of_global_soil_heterotrophic_respiration/links/624a9fdd7931cc7ccf13d6d1/Overestimation-of-global-soil-heterotrophic-respiration.pdf. Acesso em: 1 jul. 2024.

ZEESHAN, Muhammad; ZHOU, Wenjun; WU, Chuansheng; YAN, Lin. Soil heterotrophic respiration in response to rising temperature and moisture along an altitudinal gradient in a subtropical forest ecosystem, Southwest China. **The Science of The Total Environment**, 1 jul. 2024. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356202450_Soil_heterotrophic_respiration_in_response_to_rising_temperature_and_moisture_along_an_altitudinal_gradient_in_a_subtropical_forest_ecosystem_Southwest_China. Acesso em: 1 jul. 2024.

ZHENG, Pengfei; WANG, Dandan; YU, Xinxiao; JIA, Guodong. Effects of drought and rainfall events on soil autotrophic respiration and heterotrophic respiration. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Estados Unidos, v. 308. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347767337_Effects_of_drought_and_rainfall_events_on_soil_autotrophic_respiration_and_heterotrophic_respiration. Acesso em: 14 abr. 2024.