UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

ALAN GOMES DE OLIVEIRA

ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO DE DISSIPAÇÃO TÉRMICA, INTERCEPTAÇÃO E CICLAGEM DE NUTRIENTES EM UM FRAGMENTO DE SILVICULTURA NO SUL DA BAHIA

PORTO SEGURO
2025

ALAN GOMES DE OLIVEIRA

ESTIMATIVA DE TRANSPIRAÇÃO PELO MÉTODO DE DISSIPAÇÃO TÉRMICA, INTERCEPTAÇÃO E CICLAGEM DE NUTRIENTES EM UM FRAGMENTO DE SILVICULTURA NO SUL DA BAHIA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais da Universidade Federal do Sul da Bahia e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, com vistas à obtenção do título de mestre(a) em Ciências e Tecnologias Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Berton Zanchi

PORTO SEGURO
2025

Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB)
Sistema de Bibliotecas (SIBI)

O48e Oliveira, Alan Gomes de, 2000 –
Estimativa de transpiração pelo método de dissipação térmica, interceptação e ciclagem de nutrientes em um fragmento de silvicultura no Sul da Bahia. / Alan Gomes de Oliveira. – Porto Seguro, 2025.
76 f.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício Berton Zanchi
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Sul da Bahia. Centro de Formação em Ciências Ambientais. Programa de Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Ambientais. Campus Sosígenes Costa.

1. Intercepção de Chuva. 2. Transpiração. 3. Ciclagem de Nutrientes. 4. Eucalipto. 5. Sul da Bahia. I. Zanchi, Fabrício Berton. II. Título.

CDD – 581.129

Elaborado por Lucas Sousa Carvalho - CRB-5/1883

ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO NO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

Aos 17 dias do mês de fevereiro do ano de 2025, às 10h00, de forma híbrida, com a webconferência, por meio da sala virtual com link de transmissão https://meet.google.com/tqt-owqc-btb, reuniram-se os/as membros/as da banca examinadora composta pelos/as docentes Dr. Fabrício Berton Zanchi (orientador e presidente da banca), Dr. Daniel Piotto (membro externo ao Programa), Dr. Allison Gonçalves Silva (membro interno ao Programa) e Dra. Andresa Oliva (membra externa ao Programa), a fim de arguirem o mestrando Alan Gomes de Oliveira na defesa de sua dissertação de mestrado, cujo trabalho de pesquisa intitula-se "Estimativa de Transpiração pelo Método de Dissipação Térmica, Interceptação e Ciclagem de Nutrientes em um Fragmento de Silvicultura no Sul da Bahia". Aberta a sessão pelo presidente da mesma, coube ao candidato, na forma regimental, expor o tema de sua dissertação, dentro do tempo regulamentar, sendo em seguida questionado pelos/a membros/a da banca examinadora, tendo dado as explicações que foram necessárias. Após reunião em sessão secreta, os/as membros/as da banca consideraram a dissertação:

(x) Aprovada com Louvor ( ) Aprovada ( ) Reprovada

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
FABRICIO BERTON ZANCHI
Data: 17/02/2025 17:38:12-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Fabrício Berton Zanchi (IFBA/UFSB/PPGCTA)
Orientador e Presidente da banca

Daniel Piotto
Matrícula SIAPE: 1913068
Docente CF-CTAF
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA

Dr. Daniel Piotto (CFCAf/UFSB)
Membro externo

Documento assinado digitalmente
ALLISON GONCALVES SILVA
Data: 18/02/2025 11:31:30-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Allison Gonçalves Silva (IFBA)
Membro interno

Documento assinado digitalmente
ANDRESA OLIVA
Data: 18/02/2025 13:15:35-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Andresa Oliva (CFCAm/UFSB)
Membra externa

Documento assinado digitalmente
ALAN GOMES DE OLIVEIRA
Data: 18/02/2025 13:42:34-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Alan Gomes de Oliveira
Nome do discente

Webconferência, 17 de fevereiro de 2025.

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o amor, apoio e compreensão em todos os momentos, especialmente nos dias mais difíceis. Em especial, à Dona Maria, minha mãe, por todo o suporte, apoio, confiança e por sempre acreditar em mim; à minha irmã, Andréa, por sempre me incentivar e nunca me deixar desistir; à minha sobrinha, Amélie, por estar sempre comigo; a minha vó, Dona Miralva, por sempre estar comigo, ao meu cunhado, Rafael Senna (*in memoriam*), que infelizmente não pôde estar presente, mas que acompanhou o início da minha trajetória e sempre me motivou; e ao meu padrasto, Luciano, por seu constante apoio. E a todos os membros da minha família que me apoiaram e estiveram comigo.

Aos amigos, Ana Luiza, Ana Carolina, Bruno, Diego, Gabriel, Jefferson, Matheus (e todos os demais que não mencionei), que me ofereceram apoio, escuta e alegria, que caminharam comigo, vocês tornaram essa trajetória muito mais leve. E em especial, a Juliana Mesquita, por não deixar eu desistir, e por estar presente em todos os momentos, da seleção à minha defesa, você foi fundamental.

Agradeço a Prof° Dr. Fabrício Berton Zanchi, pela orientação, dedicação, paciência, amizade e incentivo constante durante todas as etapas deste trabalho e durante todos os cinco anos que trabalhamos juntos. Sua confiança e comprometimento foram fundamentais para que esta dissertação se concretizasse, e para que eu me tornasse um cientista.

Aos professores e colegas do PPGCTA, Interdisciplinar em Ciências e Ciência Biológicas, minha gratidão pelas trocas, colaborações e por todo o ambiente de aprendizado e crescimento que compartilhamos.

Agradeço aos membros do Laboratório de Ecohidrologia - CSC e também amigos, Bruno, Laurindo Neto e Jadilson que foram indispensáveis para a execução da pesquisa. Aos motoristas Max e Adriano, pelas viagens a campo.

Ao Laboratório de Química Ambiental do IFBA, pelo suporte técnico, infraestrutura e por proporcionar o espaço para o desenvolvimento deste estudo. E ao Prof,° Dr. Allison, pelo suporte em laboratório e aprendizado. Ao Lazáro Simião, hoje Prof° de Química, pela ajuda e dedicação em laboratório.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação. A cada um e a cada uma, meu sincero muito obrigado!

EPÍGRAFE

"*A ciência avança um funeral por vez*" – Max Planck

OLIVEIRA, Alan Gomes de. **Estimativa da transpiração pelo método de dissipação térmica, interceptação e ciclagem de nutrientes em um fragmento de silvicultura no sul da Bahia**. Orientador: Fabrício Berton Zanchi. 2025. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Ambientais) – Universidade Federal do Sul da Bahia; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Porto Seguro, 2025.

RESUMO

O gênero *Eucalyptus* é amplamente cultivado em todo o mundo, sendo reconhecido por seu rápido crescimento e elevado rendimento. Suas características, como alta resistência a condições adversas, tolerância a solos inférteis e produção de madeira de alta qualidade, tornam-no uma escolha estratégica para plantações comerciais. As florestas plantadas de *Eucalyptus* são fundamentais para a mitigação da pressão sobre florestas naturais, contribuindo para a conservação de ecossistemas nativos e da biodiversidade. A expansão das plantações de *Eucalyptus* tem sido um tema relevante tanto para a economia quanto para o meio ambiente. De um lado, essas plantações são essenciais para a produção de celulose, papel e madeira, setores que impulsionam a economia de vários países. Considerando o papel central das florestas no ciclo hidrológico e na ciclagem de nutrientes, é fundamental compreender os fatores fisiológicos, ecológicos e ambientais que influenciam a perda de água em regiões florestais e a dinâmica dos nutrientes. Esse entendimento permite não apenas otimizar a produtividade das plantações, mas também reduzir os impactos ambientais, promovendo um equilíbrio entre conservação e exploração econômica dos recursos naturais. Este estudo teve como objetivo investigar a influência de fatores climáticos produção de biomassa foliar, entrada de nutrientes, decomposição da serrapilheira e a liberação de nutrientes, bem como aspectos da redistribuição da precipitação, incluindo as perdas de água por interceptação, a recarga hídrica do solo pela precipitação interna e o escoamento pelo tronco. A análise desses processos permitiu compreender como diferentes clones respondem a diferentes padrões climáticos e como os nutrientes são reciclados no ecossistema, garantindo a sustentabilidade deste tipo de sistema florestal. Além disso, foi avaliada a transpiração utilizando sondas de Granier pelo método de dissipação térmica. A pesquisa foi conduzida com dois clones híbridos de *Eucalyptus* (*E. grandis* × *urophylla*), CO 1407 e VCC 865. Apesar de estarem submetidos a condições ambientais semelhantes, os resultados revelaram diferenças significativas na ecohidrologia e fisiologia dos clones, indicando respostas distintas aos fatores abióticos. Essas diferenças ressaltam a importância de selecionar clones adequados para diferentes regiões e condições climáticas, contribuindo para um manejo florestal mais eficiente e sustentável. Assim, os resultados deste estudo podem fornecer subsídios valiosos para a adoção de práticas silviculturais que aliem produtividade à sustentabilidade.

Palavras-chave: interceptação de chuva, transpiração, ciclagem de nutrientes, eucalipto, sul da Bahia.

OLIVEIRA, Alan Gomes de. **Estimation of transpiration using the thermal dissipation method, interception, and nutrient cycling in a forestry fragment in southern Bahia.**. Advisor: Fabrício Berton Zanchi. 2025. Dissertation (Master's in Environmental Science & Technology) – Universidade Federal do Sul da Bahia; Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Porto Seguro, 2025.

ABSTRACT

The *Eucalyptus* genus is widely cultivated worldwide, being recognized for its rapid growth and high yield. Its characteristics, such as high resistance to adverse conditions, tolerance to infertile soils, and the production of high-quality wood, make it a strategic choice for commercial plantations. Planted Eucalyptus forests are fundamental for mitigating the pressure on natural forests, contributing to the conservation of native ecosystems and biodiversity. The expansion of Eucalyptus plantations has been a relevant topic for both the economy and the environment. On one hand, these plantations are essential for the production of pulp, paper, and wood, sectors that drive the economy of several countries. Considering the central role of forests in the hydrological cycle and nutrient cycling, it is crucial to understand the physiological, ecological, and environmental factors that influence water loss in forest regions and nutrient dynamics. This understanding not only optimizes plantation productivity but also reduces environmental impacts, promoting a balance between conservation and the economic exploitation of natural resources. This study aimed to investigate the influence of climatic factors on leaf biomass production, nutrient input, litter decomposition, and nutrient release, as well as aspects of precipitation redistribution, including water losses due to interception, soil water recharge through throughfall, and stemflow runoff. The analysis of these processes allowed for understanding how different clones respond to various climatic patterns and how nutrients are recycled within the ecosystem, ensuring the sustainability of this type of forest system. Additionally, transpiration was evaluated using Granier probes through the thermal dissipation method. The research was conducted with two hybrid *Eucalyptus* clones (*E. grandis* × *E. urophylla*), CO 1407 and VCC 865. Although they were subjected to similar environmental conditions, the results revealed significant differences in the ecohydrology and physiology of the clones, indicating distinct responses to abiotic factors. These differences highlight the importance of selecting suitable clones for different regions and climatic conditions, contributing to a more efficient and sustainable forest management. Thus, the results of this study may provide valuable support for the adoption of silvicultural practices that combine productivity with sustainability.

Keywords: rainfall interception, transpiration, nutrient cycling, eucalyptus, southern Bahia

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL 7
2 OBJETIVOS 9
2.1 Objetivo geral 9
2.2 Objetivos específicos 9
3 CAPÍTULO 1 – Eucalipto e o ciclo da água: Como os clones híbridos afetam a disponibilidade de água em ecossistemas florestais? 13
Resumo 14
Abstract 14
Introdução 12
Material e métodos 16
Resultados e Discussão 19
Conclusão 24
Referências 25
4 CAPÍTULO 2 – Influência climática na transpiração de clones de híbridos de Eucalipto 30
Resumo 31
Abstract 31
Introdução 32
Material e métodos 33
Resultados e Discussão 36
Conclusão 42
Referências 43
5 CAPÍTULO 3 – Ciclagem de nutrientes em um cultivo de clones híbridos de Eucalipto 46
Resumo 47
Abstract 47
Introdução 48
Material e métodos 49
Resultados 53
Discussão 58
Conclusão 66
Referências 67
6 CONCLUSÃO GERAL 73
REFERÊNCIAS 74
APÊNDICES 75
APÊNDICE A – Material suplementar da validação do método de determinação de metais pesados em tecido vegetal. 75

1 INTRODUÇÃO GERAL

As florestas plantadas são essenciais para o desenvolvimento socioeconômico em todo o mundo, abastecendo diversos setores, como as indústrias de fibras, madeira e produtos florestais não madeireiros (GABIRA et al., 2023). À medida que essas florestas se expandem, sua relevância na produção global de madeira, na oferta de serviços ambientais e no desenvolvimento regional se torna cada vez maior (NEPAL et al., 2019). Entre os gêneros amplamente cultivados, destaca-se o *Eucalyptus*, presente em mais de 95 países, com uma área total de plantio que ultrapassa 22,57 milhões de hectares globalmente. Os principais fatores que impulsionam a rápida expansão do gênero no mundo estão relacionados com seu crescimento acelerado e alto rendimento, combinados com o formato de tronco, ideal para a produção de madeira, além da sua alta tolerância a solos inférteis (ZHANG et al., 2021; KABIR et al., 2021). No Brasil, a área total de florestas plantadas alcançou 10 milhões de hectares em 2023, cerca de 7,8 milhões de hectares para o gênero (IBÁ, 2024), estando na 1° posição de maior produtor global (FLORÊNCIO et al., 2022).

A vegetação global e o clima estão intimamente ligados, influenciando-se mutuamente em múltiplas direções. As mudanças climáticas provocam alterações na vegetação e, da mesma forma, mudanças na vegetação impactam o clima (Sheil, 2018). Um dos principais fatores que influenciam a relação planta-atmosfera, é a interceptação de chuva, que impacta diretamente todos os parâmetros hidrológicos de uma floresta e desempenha um papel fundamental na disponibilidade hídrica de uma região (TSIKO et al., 2012; LIAN et al., 2022). A perda de água por interceptação também pode reduzir a transpiração, ao bloquear algumas aberturas dos estômatos e limitar as trocas de vapor de água entre a folha e o ar (Dawson & Goldsmith, 2018; Lian et al., 2022). O processo de transpiração, está envolvido nas estratégias de conservação da água, que permite o crescimento e a sobrevivência das plantas (DAWSON & GOLDSMITH, 2018; WU et al., 2021), sendo um dos responsáveis pela regulação de temperatura das plantas, transporte de nutrientes e manutenção do equilíbrio hidrológico (LIN et al., 2017; BRAMLEY et al., 2022; CHEN et al., 2023). No entanto, o manejo intensivo de florestas plantadas, principalmente em sistemas de curta rotação e práticas de talhadia, pode ter impactos significativos nas bacias hidrográficas. Essas práticas podem aumentar a dependência da quantidade de precipitação, e em anos de chuvas abaixo da média, podem acelerar o esgotamento dos recursos hídricos, comprometendo o fornecimento de água para outras culturas (CASSIANO et al., 2023).

Além dos recursos hídricos, o manejo adequado de florestas também depende de processos fundamentais do ciclo de nutrientes. Ao qual incluem a absorção e armazenamento de nutrientes nos tecidos perenes da vegetação, a produção e decomposição da serapilheira, transformações de nutrientes no solo, a entrada de nutrientes via deposição atmosférica e intemperismo, bem como a exportação por lixiviação e transferência gasosa (Foster & Bhatti, 2005). Em ecossistemas florestais, a produção e decomposição da serapilheira desempenham um papel fundamental no ciclo biogeoquímico, influenciando diretamente a fertilidade do solo e, consequentemente, a produtividade florestal (HOLANDA et al., 2017; GIWETA, 2020; ASIGBAASE et al., 2021). Dessa forma, o manejo adequado deve considerar não apenas a regulação hídrica, mas também o ciclo de nutrientes, fundamental para sustentabilidade das florestas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo desta pesquisa é realizar uma análise sobre a influência de variáveis climáticas na interceptação de chuva, transpiração e ciclagem de nutrientes em um cultivo de clones híbridos (*Eucalyptus grandis x urophylla*) CO 1407 e VCC 865 no extremo sul da Bahia.

2.2 Objetivos específicos

- Compreender o comportamento hídrico nos períodos seco e chuvoso, identificando as taxas de interceptação, escoamento pelo tronco e precipitação interna;
- Avaliar a produção de serapilheira, entrada de nutrientes , taxa de decomposição e a eficiência da liberação de nutrientes;
- Avaliar a influência de variáveis climáticas na transpiração de clones híbridos de Eucalipto.

3 CAPÍTULO 1[1] – Eucalipto e o ciclo da água: Como os clones híbridos afetam a disponibilidade de água em ecossistemas florestais.

[1] Este capítulo está organizado conforme o estilo do periódico *The International Journal of River Basin Management*, ao qual foi submetido para avaliação e possível publicação.

Resumo

Em plantações florestais de alta produtividade, a interceptação de chuva pela vegetação, o escoamento pelo tronco e a precipitação interna são fundamentais na estimativa do balanço hídrico. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o comportamento da redistribuição da precipitação em um plantio de clones híbridos CO 1407 e VCC 865 (*E. grandis x urophylla*). O monitoramento ocorreu durante dois anos, com coletas contínuas, utilizando pluviômetros móveis e aleatórios para a precipitação e coletores acoplados com mangueiras para o escoamento pelo tronco. Os resultados desta pesquisa indicam que há uma forte influência da intensidade da precipitação na capacidade de interceptação de chuva pela copa dos clones. Os valores de interceptação e precipitação são próximos aos encontrados para o gênero na literatura, enquanto que o escoamento pelo tronco é relativamente menor. Entre os clones, o CO 1407 apresenta uma maior capacidade de abastecimento dos aquíferos devido à menor capacidade de retenção de água via interceptação.

Palavras-chave: precipitação, interceptação, eucalipto, escoamento pelo tronco, silvicultura.

Abstract

In high-productivity forest plantations, rainfall interception by vegetation, stemflow, and throughfall are essential for estimating the water balance. This study aimed to evaluate the redistribution behavior of precipitation in a plantation of hybrid clones CO 1407 and VCC 865 (*E. grandis* × *urophylla*). Monitoring was conducted over two years with continuous data collection using mobile and randomly placed rain gauges for precipitation and collectors with hoses for stemflow measurement. The results indicate a strong influence of rainfall intensity on the canopy's interception capacity. The interception and throughfall values are similar to those reported in the literature for the genus, while stemflow is relatively lower. Among the clones, CO 1407 shows a greater capacity for aquifer recharge due to its lower water retention capacity via interception.

Keywords: precipitation, interception, eucalyptus, stemflow, forestry.

Introdução

Em florestas naturais ou plantadas, o balanço hídrico depende de fatores como precipitação, interceptação de água pelo dossel, escoamento lateral, escoamento interno, percolação e evapotranspiração (Zanchi et al., 2015; Arcova et al., 2021; Ferreto et al., 2021).

Com exceção da precipitação, os demais fatores são influenciados diretamente pelo tipo de solo, pela densidade e cobertura do dossel, bem como pelo comportamento fisiológico das plantas (Savenije, 2004; Zanchi et al., 2015; Arcova et al., 2021). A chuva que incide sobre uma bacia florestal é naturalmente dividida em três componentes. A interceptação corresponde à parcela da chuva que é retida pela vegetação e posteriormente evaporada durante ou após o evento pluviométrico, a precipitação interna refere-se à parte da chuva que atinge diretamente o solo após atravessar a vegetação, enquanto o escoamento pelo tronco representa a fração da chuva que escoa pelos troncos das árvores até alcançar o solo (Gligio & Kobiyama, 2013; Paula et al., 2020; Oliveira et al., 2024).

A interceptação influencia diretamente todos os processos hidrológicos, incluindo infiltração, recarga, umidade do solo, escoamento e a geração de inundações (Tsiko et al., 2012; Lian et al., 2022). No entanto, apesar de sua relevância, a interceptação ainda é subestimada em modelos hidrológicos (Savenije, 2004), pois a obtenção de dados sobre esse processo é complexa e onerosa. As florestas interceptam mais água em comparação com áreas de pastagem e cultivos agrícolas. Assim, mudanças na cobertura vegetal afetam diretamente o volume de água perdido no processo de interceptação (Fathizadeh et al., 2017). Além das características do dossel, os principais fatores físicos que influenciam a interceptação incluem atributos da precipitação, como intensidade e duração, condições meteorológicas e época do ano (Moura et al., 2009; Gligio & Kobiyama, 2013). Além disso, a evaporação da água interceptada desempenha um papel relevante, especialmente em regiões de clima quente (Savenije, 2004). Considerando esses fatores, os modelos hidrológicos buscam compreender a dinâmica do processo de redistribuição da precipitação, sendo fundamentais para a gestão de bacias hidrográficas e o planejamento de estratégias voltadas à conservação dos recursos hídricos (Sari et al., 2016; Farias et al., 2022).

No Brasil, as florestas plantadas têm crescido exponencialmente, alcançando 10 milhões de hectares em 2023. Entre as espécies cultivadas, destaca-se o eucalipto, que representa 76,8% da área total de plantio (IBÁ, 2024). Esse aumento constante das florestas plantadas ressalta a necessidade de uma compreensão mais aprofundada da ecofisiologia das espécies e das limitações dos recursos naturais para o seu crescimento (Stape et al., 2010). Contudo, a expansão dos plantios florestais pode provocar alterações significativas no equilíbrio hidrológico de uma região, impactando a disponibilidade de água nas bacias hidrográficas (Ferraz et al., 2019; Silva et al., 2020). A redução hídrica, intensificada pelas mudanças climáticas, pode agravar esses efeitos, resultando em impactos negativos tanto para a biodiversidade quanto para os usos humanos da água (IPCC, 2021). Estudos indicam que

extensas áreas de plantios de eucalipto podem aumentar a evapotranspiração e reduzir o escoamento superficial, agravando a escassez hídrica em determinadas regiões (Scott & Prinsloo, 2008).

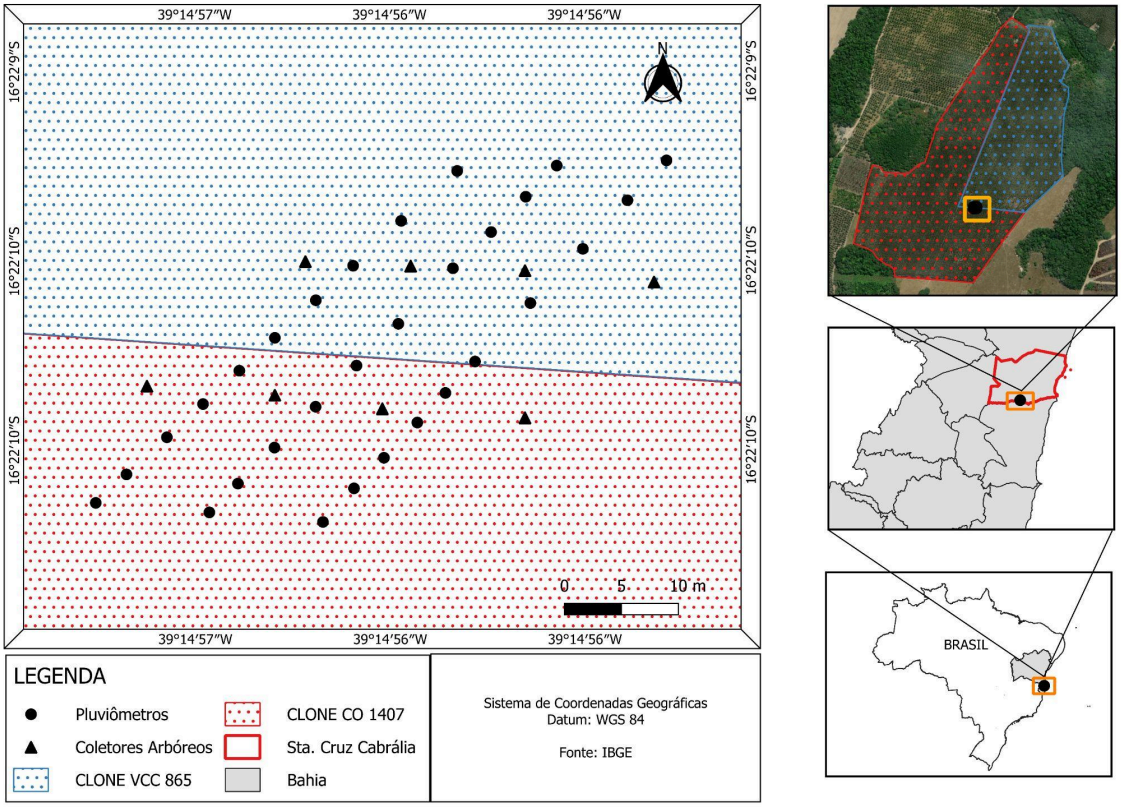
Encontrar clones com menor capacidade de interceptação pode contribuir para um balanço hídrico mais positivo, garantindo a produtividade das plantações comerciais e minimizando o impacto na disponibilidade de água do ecossistema diante da redução da precipitação devido às mudanças climáticas (Hakamada et al., 2020). Sendo essencial considerar estratégias de manejo sustentável que equilibrem a produção florestal com a conservação dos recursos hídricos e a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas nas bacias hidrográficas (Keestra et al., 2018; Mencia et al., 2021). Portanto, o objetivo desta pesquisa foi compreender e caracterizar o comportamento hídrico de dois clones híbridos de *E. grandis* × *urophylla* (CO 1407 e VCC 865) em relação à distribuição da precipitação sob diferentes condições climáticas e hidrológicas da região, por meio de uma análise sazonal.

Material e métodos

Área de estudo

O experimento foi conduzido na Fazenda Bela Vista, situada às margens da BR-367, entre Porto Seguro e Santa Cruz de Cabrália, no Extremo Sul da Bahia, entre as coordenadas geográficas 16°22'14.286"S e 39°14'59.211"W (Fig. 1). A precipitação média anual da região é de 1363 mm, caracterizada por um período chuvoso e outro seco com menor quantidade de chuvas, apresentando máximas em novembro e mínimas em fevereiro (Oliveira et al. 2023). O estudo foi realizado entre fevereiro de 2022 e dezembro de 2023, avaliando uma plantação de seis anos de idade com aproximadamente 58 hectares de clones híbridos CO 1407 e VCC 865 (*E. grandis* × *urophylla*). O espaçamento de plantio entre os clones é de 3,6 m x 2,5 m.

Figura 1 - Mapa de localização da Fazenda Bela Vista e delineamento experimental.



Medidas da Precipitação incidente (P)

A precipitação incidente foi medida em uma área aberta utilizando dois pluviômetros totalizadores, posicionados a uma distância de 150 metros do experimento de precipitação interna. A instalação dos pluviômetros considerou a menor distância possível da área experimental, bem como a exigência de uma distância equivalente a duas vezes a altura dos obstáculos presentes na cobertura florestal, para evitar interferências. Os coletores de chuva foram confeccionados a partir de garrafas PET de 2 litros, com um diâmetro de 10 cm (Zanchi et al., 2015), e instalados com um espaçamento de 5 metros entre eles, fixados em estacas a uma altura de 2 metros do solo. As coletas de precipitação foram realizadas após cada evento de chuva, garantindo a precisão dos dados coletados.

Medidas da Precipitação interna (Pi)

A precipitação interna foi medida utilizando pluviômetros confeccionados a partir de garrafas PET de 2 litros. As garrafas foram cortadas acima da metade, e a parte superior foi invertida e inserida na inferior, formando um recipiente com capacidade aproximada de 1,5 litros, equipado com um funil de 10 cm de diâmetro para a coleta da água. Para otimizar as

coletas, foram instaladas três linhas paralelas de 50 metros de comprimento, com espaçamento de 10 metros entre elas. Cada linha foi dividida de maneira que metade de sua extensão estivesse em cada lado dos clones.

O delineamento experimental incluiu 10 pluviômetros por linha, distribuídos a cada 1 metro de distância entre si. Dentro de cada linha, foram selecionadas de forma aleatória 5 posições para instalar os pluviômetros, dentre as 25 posições possíveis, em cada lado dos clones (Holwerda et al., 2005; Zanchi et al., 2015). As posições dos pluviômetros foram reposicionadas aleatoriamente a cada nova medição, garantindo maior representatividade dos dados coletados. As novas posições foram geradas utilizando o software RStudio (2024).

Medidas do Escoamento pelo tronco (Et)

O escoamento pelo tronco foi medido utilizando cinco coletores instalados em árvores de cada um dos clones híbridos VCC 865 e CO 1407 (*E. grandis x urophylla*). A seleção das árvores que receberam os coletores foi baseada em sua representatividade em termos do diâmetro à altura do peito (DAP), escolhendo-se indivíduos com DAP ≥ 15 cm.

As árvores selecionadas foram identificadas com numeração em tinta spray.Para a coleta do escoamento, os troncos das árvores foram envolvidos por mangueiras transparentes de ¾ de polegada, dispostas em formato espiral, completando uma volta e meia ao redor do tronco, com o ponto mais alto a 1,5 metros de altura. As mangueiras foram cortadas longitudinalmente, abertas e fixadas nos troncos com grampos e silicone acético selante, garantindo a vedação e evitando vazamentos. Esse sistema transformou a mangueira em uma canaleta, direcionando todo o fluxo de água que escorria pelo tronco para um reservatório de 5 litros, permitindo a quantificação precisa do volume de água escoado (Holwerda et al., 2005).

As coletas foram realizadas seguindo o mesmo padrão dos pluviômetros, sendo efetuadas após cada evento de chuva. O volume de água acumulado nos reservatórios foi medido com o auxílio de uma proveta graduada. O cálculo do escoamento pelo tronco foi realizado com base na equação 1:

$$Et = V * d \tag{1}$$

Sendo:

Et: Escoamento pelo tronco (mm)

V: Volume médio em litros de todas as árvores

d: Densidade (árvores/m^2)

2.7 Estimativa da Interceptação (I)

O índice de interceptação foi calculado através da equação 2.

$$I = P - (Pi + Et) \quad (2)$$

Sendo:

I: Interceptação (mm)

P: Precipitação incidente (mm)

Pi: Precipitação interna (mm)

Et: Escoamento pelo tronco (mm)

Análise estatística

Os dados foram coletados nos períodos chuvoso e seco. A precipitação foi classificada de acordo com classe, frequência e intensidade, sendo analisada para cada clone, com ênfase no comportamento da interceptação em diferentes intensidades pluviométricas. As classes de precipitação foram definidas como: 0,1–5; 5,1–10; 10,1–20; 20,1–40 e >40 mm.

Os dados foram submetidos à análise de correlação e regressão linear, além do Teste t de Student para verificar diferenças entre as médias ($\alpha = 0,05$) (Silva et al., 2022), utilizando o *software* R Studio (2025).

Resultados e Discussão

A precipitação total coletada foi de 547,5 mm no período seco e de 754,1 mm na estação chuvosa. Entre os eventos registrados, a precipitação média foi de 26,07 mm no período seco e de 53,86 mm na estação chuvosa (Tabela 1).

A intensidade das chuvas influenciou diretamente a redistribuição da água nas florestas de *Eucalyptus*. Em eventos de baixa intensidade (0,1 a 5 mm), foram observados os maiores índices de interceptação pelas copas, bem como os maiores volumes de escoamento pelo tronco em ambos os clones. Com o aumento da intensidade pluviométrica, notamos

maiores volumes de precipitação interna, o que resultou em menor interceptação e, consequentemente, menor retorno da água à atmosfera. Esse comportamento hidrológico reforça a compreensão de que eventos mais intensos favorecem a recarga dos aquíferos, uma vez que proporcionam maior infiltração direta no solo e diminuição das perdas por evaporação no dossel. Além disso, contribui para a manutenção da umidade do solo, beneficiando a disponibilidade hídrica para as plantas, especialmente em períodos subsequentes de menor precipitação (Ferraz et al., 2019; Silva et al., 2020; Farias et al., 2022).

Tabela 1 - Distribuição da precipitação em classes de intensidade (P = Precipitação; Pi = Precipitação interna; Et = Escoamento pelo tronco; I = Interceptação)

			CO 1407			VCC 865		
Intensidade (mm)	Frequência (%)	P (mm)	Pi (%)	Et (%)	I (%)	Pi (%)	Et (%)	I (%)
0,1 - 5	8,6	4,0	67,1	1,0	31,9	65,3	1,0	33,7
5,1 - 10	20,0	6,8	84,8	0,7	14,5	89,1	0,8	10,1
10,1 - 20	17,1	15,3	80,9	0,5	18,6	80,9	0,5	18,6
20,1 - 40	25,7	27,8	88,9	0,6	10,5	86,8	0,7	12,5
>40	28,6	86,1	84,7	0,7	14,7	84,9	0,6	14,5

A precipitação interna nos plantios de *Eucalyptus* indicou alta variabilidade em função da intensidade das chuvas, da sazonalidade climática e das características estruturais do dossel arbóreo (Corrêa et al., 2019; Poleto et al., 2021). Neste estudo, notamos que, durante a estação seca, a precipitação interna foi de 84,8% para o clone CO 1407 e 83,3% para o VCC 865, enquanto, na estação chuvosa, os valores aumentaram para 89,5% e 90,3%, respectivamente (Tabela 2). Esse incremento é atribuído à maior frequência de eventos intensos, que promovem o rápido escoamento da água pelas copas e superam a capacidade de retenção do dossel, favorecendo maior infiltração no solo (Neto et al., 2019; Fathizadeh et al., 2017).

A análise estatística indica forte correlação positiva ($r = 0,99$; $p < 0,05$) entre a precipitação interna e a precipitação incidente para ambos os clones em ambas as estações (Figuras 4a e 4b), sugerindo que o aumento da chuva incidente resulta em incremento quase proporcional na precipitação interna. Esse padrão hidrológico é consistente com achados de Rodrigues et al. (2009), Groppo et al. (2019) e Arcova et al. (2021), que também observaram que a precipitação interna responde de forma linear ao volume de chuva incidente, especialmente em sistemas florestais homogêneos como os de *Eucalyptus.*

Estudos anteriores corroboram com os valores encontrados para o gênero. Lima (1976) registrou 83,6% de precipitação interna em *E. saligna*; Rodrigues e Costa (2009)

relataram 80,5% em *E. grandis*, enquanto Neto et al. (2019) observaram variações sazonais marcantes em híbridos de *E. urophylla* × *grandis,* com 80,3% no período chuvoso e 70,3% no seco. Esses dados reforçam que a intensidade pluviométrica atua como o principal fator de influência na redistribuição da água no dossel, superando inclusive variações entre clones, como observado neste estudo, onde não houve diferenças estatisticamente significativas entre CO 1407 e VCC 865 ($p > 0,05$). Contudo, notamos que em 2023 os efeitos do fenômeno La Niña na região podem ter alterado os padrões de precipitação da região, descaracterizando as médias sazonais e resultando em índices de interceptação inferiores aos relatados em outros estudos (Oliveira et al., 2023). Destacando a sensibilidade da dinâmica hidrológica florestal a alterações climáticas interanuais, e reforçando a importância do monitoramento contínuo em diferentes ciclos sazonais.

O escoamento pelo tronco, é comumente ignorado em alguns estudos (Groppo et al., 2019; Neto et al., 2019), devido à baixa representação na precipitação, no entanto, é de extrema importância para a compreensão do comportamento do ciclo hidrológico, sendo uma forma eficiente de reposição da água no solo, devido a capacidade de chegar à superfície em baixa velocidade devido ao atrito com a casca das árvores, direcionando as raízes, reduzindo o escoamento superficial (Oliveira et al., 2011). Neste estudo, foram observadas taxas de escoamento pelo tronco de 0,7% para ambos os clones durante o período seco, com redução para 0,5% na estação chuvosa. Esses valores são semelhantes aos reportados por Shinzato (2011) para *E.cloeziana* (1%) e consideravelmente inferiores aos registrados em outras espécies do gênero, em que as taxas variam de 2,9% a 8,1% (Balieiro et al., 2007; Rodrigues e Costa, 2009; Poleto et al., 2021). Essa discrepância pode estar associada a diferenças morfológicas entre os clones, densidade do dossel, estrutura da casca e intensidade dos eventos pluviométricos (Moura et al., 2009; Gligio & Kobiyama, 2013; Sari et al., 2016)

A análise estatística dos dados indica uma forte correlação entre a precipitação incidente e o escoamento pelo tronco para ambos os clones avaliados. O clone CO 1407 apresentou correlação significativa na estação seca ($r = 0,80$) e chuvosa ($r = 0,77$), com a precipitação explicando 63% e 59% da variação do escoamento, respectivamente (Figura 2c). O clone VCC 865, por sua vez, demonstrou correlação ainda mais elevada na estação seca ($r = 0,83$) e ligeiramente inferior na chuvosa ($r = 0,78$), com modelos de regressão explicando 69% da variação no período seco, enquanto na estação chuvosa a dispersão dos dados foi mais acentuada. A maior homogeneidade do comportamento do escoamento pelo tronco durante a estação seca (Figura 2d) pode ser atribuída à menor variabilidade na duração e intensidade das chuvas.

Esses resultados mostram que o escoamento pelo tronco é fortemente influenciado pela intensidade e frequência da precipitação, de forma consistente ao longo das estações, e corroboram estudos anteriores que também identificaram relações significativas entre essas variáveis em plantações de *Eucalyptus* (Oliveira et al., 2008; Shinzato et al., 2011). Dessa forma, o escoamento pelo tronco deve ser considerado como um componente essencial no balanço hídrico de ecossistemas florestais plantados, principalmente em contextos onde a retenção e a redistribuição da água são determinantes para o manejo sustentável dos recursos hídricos.

Tabela 2 – Caracterização da precipitação nos períodos seco e chuvoso para os clones CO 1407 e VCC 865

CO1407	Precipitation (mm)	Throughfall (mm)	%	Stemflow (mm)	%	Interception (mm)	%
Dry Season	26,1	22,1	84,8	0,2	0,7	3,8	14,5
Wet Season	53,9	48,2	89,5	0,3	0,5	5,4	9,9
VCC 865							
Dry Season	26,1	21,7	83,3	0,2	0,7	4,2	16,0
Wet Season	53,9	48,7	90,3	0,3	0,5	5,0	9,2

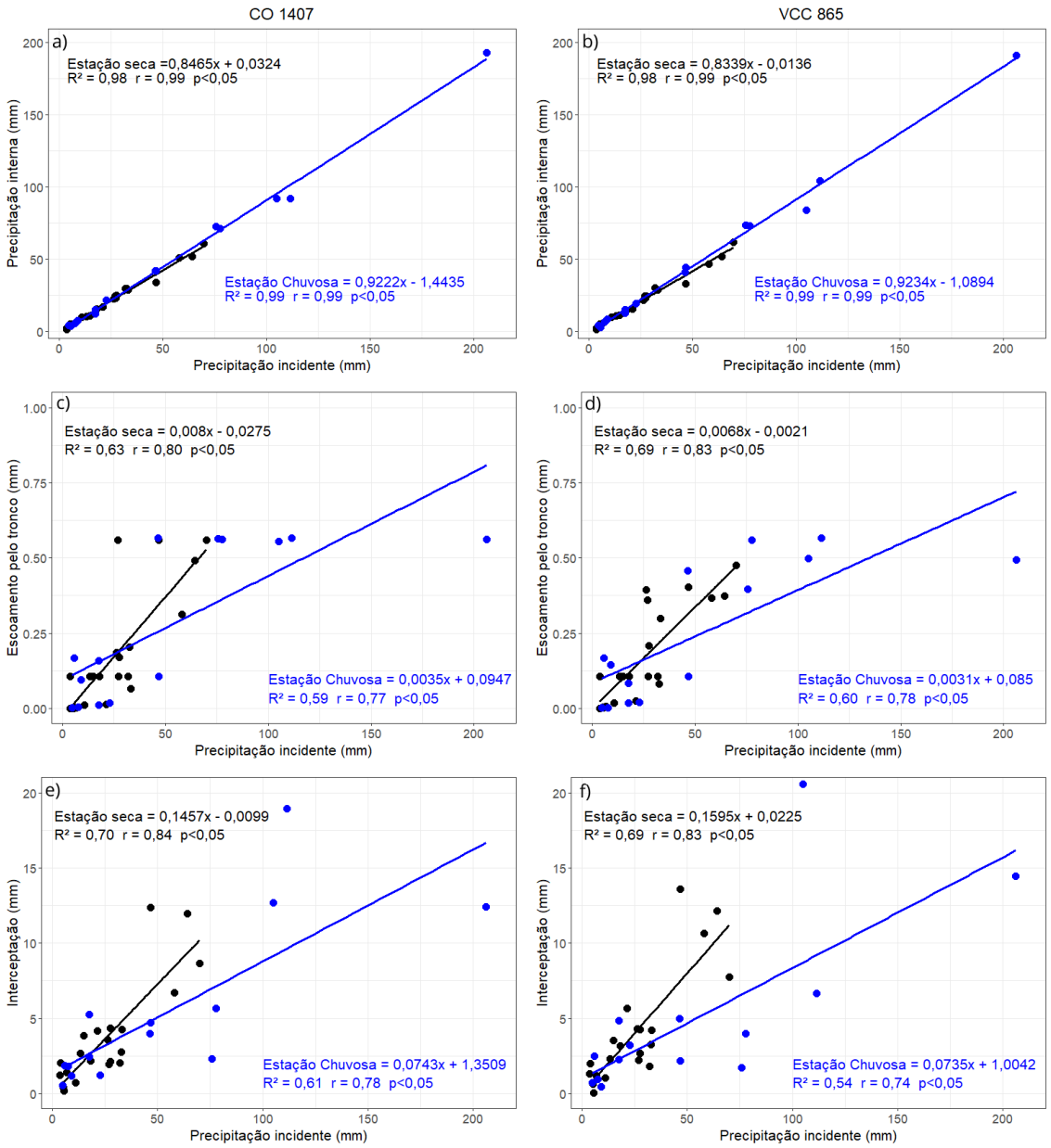
A interceptação da chuva em plantações de *Eucalyptus* pode variar de 6,6% a 14% (Rodrigues e Costa, 2009; Gligio & Kobiyama, 2013; Groppo et al., 2019). Estudos relataram valores médios dentro dessa faixa para diferentes espécies e tipos de plantio. Neste estudo, durante a estação seca, a interceptação foi de 14,5% para o clone CO 1407 e de 16,0% para o clone VCC 865 (Tabela 3), valores próximos aos encontrados na literatura. A maior taxa de interceptação no clone VCC 865 pode ser atribuída à sua copa mais densa, o que favorece a retenção da precipitação (Gligio & Kobiyama, 2013; Silva et al., 2018; Castro Filho et al., 2022). A análise estatística reforça essa interpretação, para o clone CO 1407, a interceptação apresentou alta correlação com a precipitação na estação seca (r = 0,84), com o modelo de regressão explicando 70% da variação (Fig. 2e). E também no clone VCC 865, também observamos uma forte correlação (r = 0,83), indicando que a estrutura do dossel contribui de forma consistente para o padrão observado.

No entanto, na estação chuvosa, a interceptação reduziu-se significativamente, sendo de 9,9% para o clone CO 1407 e de 9,2% para o VCC 865. Essa redução pode ser explicada pela maior intensidade das chuvas e pelo menor intervalo entre eventos, fatores que podem limitar a evaporação da água retida nas copas, reduzindo a capacidade de retenção subsequente (Izidio et al., 2013). Mesmo com essa queda, o clone CO 1407 manteve boa

correlação entre precipitação e interceptação (r = 0,78), enquanto o VCC 865 apresentou correlação um pouco inferior (r = 0,74). O modelo de regressão para o clone VCC 865 na estação chuvosa explicou apenas 54% da variabilidade (Fig. 2f), sugerindo que, sob maior intensidade pluviométrica, outras variáveis não mensuradas, como a cobertura do dossel, também podem afetar a interceptação (Zanchi et al., 2015).

Observamos que os resultados deste estudo são inferiores aos registrados em florestas naturais. Em florestas nativas da Amazônia, Zanchi et al. (2015) relataram uma interceptação de 15,6%, valor aproximadamente 25,8% superior à média observada nesta pesquisa para os clones. Na Mata Atlântica, os valores médios são ainda mais elevados, com interceptações 46,2% (seca) e 43,4% (chuvosa) superiores às registradas neste estudo (Cicco et al., 2019). Em uma Floresta Ombrófila Mista de Alto-Montana, a interceptação foi de 14%, cerca de 14,4% maior do que as taxas médias encontradas para os clones. Esses dados reforçam a ideia de que, apesar do papel relevante das plantações de *Eucalyptus* na dinâmica hídrica, sua capacidade de interceptação é inferior à das florestas nativas, especialmente em contextos de maior biodiversidade estrutural.

Figura 4 - Relação entre a interceptação de chuva e a precipitação incidente no período chuvoso e pouco chuvoso para os clones CO 1407 e VCC 865



Conclusão

Os resultados deste estudo demonstram que a intensidade da precipitação exerce influência direta sobre os processos de interceptação da chuva e o abastecimento hídrico do solo em plantações de *Eucalyptus.* Observou-se que eventos de baixa intensidade (0,1–5 mm) resultaram nas maiores perdas por interceptação. No entanto, as chuvas de maior intensidade (>20 mm) promoveram menor interceptação e maior infiltração no solo, com perdas médias reduzidas no clone CO 1407. Em relação ao clone VCC 865, as menores perdas ocorreram a

partir de 10 mm de precipitação, indicando uma menor eficiência na retenção de chuvas mais intensas.

Notamos ainda que o maior volume de água escoada pelo tronco ocorreu durante eventos de baixa intensidade (0,1–5 mm) para ambos os clones. Embora as diferenças entre os cultivares não tenham sido estatisticamente significativas, o clone VCC 865 apresentou, de forma consistente, maiores taxas de interceptação, possivelmente associadas à maior densidade de copa e às características morfológicas de seu caule.

Considerando a recarga dos aquíferos como variável crítica para a sustentabilidade hídrica regional, o clone CO 1407 destacou-se como o mais adequado. Sua menor taxa de interceptação, aliada à maior contribuição para o escoamento efetivo em direção ao solo, favorece não apenas o abastecimento hídrico imediato, mas também a recarga de reservas subterrâneas ao longo do tempo. Esse comportamento é especialmente relevante em regiões com alta demanda hídrica ou suscetíveis à variabilidade climática, como períodos de estiagem prolongada. Assim, o uso do clone CO 1407 pode representar uma estratégia mais eficiente de manejo florestal voltada à conservação dos recursos hídricos, sem comprometer a produtividade florestal.

Referências

Arcova, F. C. S., Ranzini, M., Nakagawa, F., de Cicco, V., & de Lima, I. L. (2021). TRANSPRECIPITAÇÃO E INTERCEPTAÇÃO DA CHUVA EM ÁREA REFLORESTADA COM Tibouchina mutabilis Cogn. NA SERRA DO MAR. Revista Brasileira De Climatologia, 27, 222–240.

Arcova, F. C. S., Ranzini, M., & Cicco, V. D. (2018). PARTITIONING OF RAINFALL IN EXPERIMENTAL PLANTATIONS OF Eucalyptus urophylla AND Pinus elliottii. Floresta, 48(3), 383. https://doi.org/10.5380/rf.v48i3.55492

Balieiro, F. de C., Franco, A. A., Fontes, R. L. F., Dias, L. E., Campello, E. F. C., & Faria, S. M. de. (2007). Evaluation of the throughfall and stemflow nutrient contents in mixed and pure plantations of Acacia mangium, Pseudosamenea guachapele and Eucalyptus grandis. Revista Árvore, 31(2), 339–346. https://doi.org/10.1590/s0100-67622007000200017

Castro Filho, M. N. de, Tagliaferre, C., Oliveira, F. de S., Silva, B. L. da, Alves, R. O., Paula, A. de, & Barros, F. M. (2022). BIOMASS OF TWO Eucalyptus CLONES (E. grandis × E. urophylla) IRRIGATED WITH SALINE WATER. Revista Árvore, 46. https://doi.org/10.1590/1806-908820220000012

Calux, J., & Thomaz, E. L. (2013). INTERCEPTAÇÃO E PRECIPITAÇÃO INTERNA: COMPARAÇÃO ENTRE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA E Pinus elliotttii var. elliotti. Geoambiente on-line, 19, 01. https://doi.org/10.5216/revgeoamb.v0i19.26049

Corrêa, R. S., Schumacher, M. V., Momolli, D. R., & Berger, C. (2019). Aspectos da precipitação pluviométrica em um povoamento jovem de Eucalyptus dunnii no Bioma Pampa. Advances in Forestry Science, 6(3), 717–721. https://doi.org/10.34062/afs.v6i3.7617

Farias, C. F. de S., José, J. V., Leite, K. N., Souza, M. D., Amaral, M. A. C. M., & Silva, S. S. da. (2022). Mapeamento da interceptação de chuva na bacia hidrográfica do Alto Juruá, Acre. Research, Society and Development, 11(1), e6711124343. https://doi.org/10.33448/rsd-v11i1.24343

Fathizadeh, O., Hosseini, S. M., Zimmermann, A., Keim, R. F., & Darvishi Boloorani, A. (2017). Estimating linkages between forest structural variables and rainfall interception parameters in semi-arid deciduous oak forest stands. The Science of the Total Environment, 601–602, 1824–1837. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.233

Ferraz, S. F. de B., Rodrigues, C. B., Garcia, L. G., Alvares, C. A., & Lima, W. de P. (2019). Effects of Eucalyptus plantations on streamflow in Brazil: Moving beyond the water use debate. Forest Ecology and Management, 453(117571), 117571. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117571

Ferreto, D. O. C., Reichert, J. M., Lopes Cavalcante, R. B., & Srinivasan, R. (2021). Rainfall partitioning in young clonal plantations Eucalyptus species in a subtropical environment, and implications for water and forest management. International Soil and Water Conservation Research, 9(3), 474–484. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.01.002

Gash, J. H. C. (1979). An analytical model of rainfall interception by forests. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. Royal Meteorological Society (Great Britain), 105(443), 43–55. https://doi.org/10.1002/qj.49710544304

Groppo, J. D., Salemi, L. F., Moraes, J. M., Trevisan, R., Seghesi, G. B., & Martinelli, L. A. (2019). Capacidade de retenção de água do dossel vegetativo: comparação entre Mata Atlântica e plantação florestal de eucalipto. Ciencia Florestal, 29(1), 96–104. https://doi.org/10.5902/1980509816862

Holwerda, F. (2005). Water and energy budgets of rain forests along an elevation gradient under maritime tropical conditions. Vrije Universiteit, Amsterdam.

Hakamada, R. E., Hubbard, R. M., Moreira, G. G., Stape, J. L., Campoe, O., & Ferraz, S. F. de B. (2020). Influence of stand density on growth and water use efficiency in Eucalyptus clones. Forest Ecology and Management, 466(118125), 118125. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118125

Izidio, N. S. de C., Palácio, H. A. de Q., Andrade, E. M. de, Araújo Neto, J. R. de, & Batista, A. A. (2013). Interceptação da chuva pela vegetação da caatinga em microbacia no semiárido cearense. Revista Agro mbiente On-line, 7(1), 44. https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i1.977

IBÁ (Indústria Brasileira de Árvores). (2023). Relatório Anual 2024.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Keesstra, S., Nunes, J. P., Saco, P., Parsons, T., Poeppl, R., Masselink, R., & Cerdà, A. (2018). The way forward: Can connectivity be useful to design better measuring and modelling schemes for water and sediment dynamics? The Science of the Total Environment, 644, 1557–1572. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.342

Lima, J. A., & Tonello, K. C. (2023). Rainfall partitioning in Amazon Forest: Implications of reduced impact logging for hydrological processes. Agricultural and Forest Meteorology, 337(109505), 109505. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109505

Lorenzon, A. S., Dias, H. C. T., & Leite, H. G. (2013). Precipitação efetiva e interceptação da chuva em um fragmento florestal com diferentes estágios de regeneração. Revista Árvore, 37(4), 619–627. https://doi.org/10.1590/s0100-67622013000400005

Melo Neto, J. de O., Mello, C. R. de, Mello, J. M. de, & Guimarães, D. V. (2019). Comportamento físico da precipitação interna em um povoamento de Eucalyptus. Ciencia Florestal, 29(3), 1215–1226. https://doi.org/10.5902/1980509817981

Mencia, F. P. H., Zanchi, F. B., & do Nascimento Lopes, E. R. (2021). CLIMATIC CHARACTERISTICS AND THEIR IMPLICATIONS AMONG THE PEDOLOGICAL AND TOPOGRAPHICAL ASPECTS OF SOUTHERN BAHIA, BRAZIL. Revista Brasileira De Climatologia, 29, 24–48.

Moura, A. E. S. S. de, Correa, M. M., Silva, E. R. da, Ferreira, R. L. C., Figueiredo, A. de C., & Possas, J. M. C. (2009). Interceptação das chuvas em um fragmento de floresta da Mata Atlântica na Bacia do Prata, Recife, PE. Revista Árvore, 33(3), 461–469. https://doi.org/10.1590/s0100-67622009000300008

Oliveira, L. L. (2011). Sazonalidade e interceptação da chuva na Floresta Nacional em Caxiuanã - Amazônia Oriental. Scientia Plena, 7(10), 1–14.
Oliveira, L. L. de, Costa, R. F. D., Sousa, F. de A. S. de, Costa, A. C. L. da, & Braga, A. P. (2008). Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia Oriental. Acta amazonica, 38(4), 723–732. https://doi.org/10.1590/s0044-59672008000400016.

Oliveira, A. G., Zanchi, F. B., & Vieira, C. H. N. (2023). Incidência e padrões pluviométricos no sul do nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Geografia Física, 16(6), 3548–3559. https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.6.p3548-3559

Oliveira, A. G. de, Coelho, J. R. de M., & Zanchi, F. B. (2024). Thirty-one years of land use, coverage, and occupation in the municipality of Santa Cruz Cabrália, Bahia. Revista de Geografia, 41(5), 19–29. https://doi.org/10.51359/2238-6211.2024.262433
Oliveira, S., Cunha, J., Nóbrega, R. L. B., Gash, J. H., & Valente, F. (2024). Enhancing global rainfall interception loss estimation through vegetation structure modeling. Journal of Hydrology, 631(130672), 130672. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130672

Paula, A., Brilhante, F. da S., Tagliaferre, C., Castro Filho, M. N. de, Batista, W. C. A., & Barreto-Garcia, P. A. B. (2020). PRECIPITAÇÃO EFETIVA E INTERCEPTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA EM POVOAMENTO DE Eucalyptus spp. EM VITÓRIA DA CONQUISTA – BA. HOLOS - ISSN 1807-1600, 5, 1–12. https://doi.org/10.15628/holos.2020.9896

Poleto, G. C., Momolli, D. R., Schumacher, M. V., Ludvichak, A. A., Santos, K. F. dos, Stahl, J., & Alvares, C. A. (2021). Partial exclusion of precipitation: throughfall, stemflow and canopy interception in Eucalyptus plantations in southern Brazil. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 16(5), 1–12. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2645

Rodrigues, V. A., & Costa, P. N. (2009). PRECIPITAÇÃO EFETIVA E INTERCEPÇÃO DAS CHUVAS EM POVOAMENTO DE EUCALIPTO. Revista Brasileira de Engenharia de Biossistemas, 3(1), 077–086. https://doi.org/10.18011/bioeng2009v3n1p077-86

Sari, V., Paiva, E., & Paiva, J. (2016). Interceptação da chuva em diferentes formações florestais na região sul do Brasil. RBRH, 21(1), 65–79. https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p65-79

Scott, D. F., & Prinsloo, F. W. (2008). Longer‐term effects of pine and eucalypt plantations on streamflow. Water Resources Research, 44(7). https://doi.org/10.1029/2007wr006781

Shinzato, E. T., Tonello, K. C., Gasparoto, E. A. G., & Valente, R. O. A. (2011). Escoamento pelo tronco em diferentes povoamentos florestais na Floresta Nacional de Ipanema em Iperó, Brasil. Scientia Forestalis, 39(92), 395–402..

Silva, G. M. de F., Nascimento Lopes, E. R., Zanchi, F. B., & Silva, J.B.L,. (2020). Divisão fisiográfica da bacia do rio Buranhém como subsídio para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Gaia scientia, 14(4). https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2020v14n4.51802

Silva, F. R., Gonçalves-souza, T., Paterno, G. B., Provete, D. B., & Vancine, M. H. (2022). Análises ecológicas no R. Nupeea.

SILVA, Janaína Ramos de Jesus. ALTERAÇÕES MORFOLÓGICAS E FISIOLÓGICAS DURANTE O CRESCIMENTO FOLIAR EM PLANTAS JOVENS DE CLONES DE EUCALIPTO. 2018. 96 p. Dissertação de mestrado — Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, Bahia, 2018.

Souza, H. P. de, Momolli, D. R., Ludvichak, A. A., Schumacher, M. V., & Malheiros, A. C. (2019). Linear regression of incident precipitation explains the throughfall, stemflow and interception by the Eucalyptus canopy under different fertilization management. Journal of experimental agriculture international, 1–11. https://doi.org/10.9734/jeai/2019/v33i430147

Sousa, R. de C., Rizzi, N. E., Ranzini, M., Arcova, F. C. S., Cicco, V. de, & Silva, L. R. da. (2016). INTERCEPTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA PELO DOSSEL DE FLORESTA OMBRÓFILA MISTA ALTO-MONTANA NO PARQUE ESTADUAL DE CAMPOS DO JORDÃO, SP, BRASIL. Floresta, 46(2), 243. https://doi.org/10.5380/rf.v46i2.39739

Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., Fonseca, S., Loos, R. A., Takahashi, E. N., Silva, C. R., Silva, S. R., Hakamada, R. E., Ferreira, J. M. de A., Lima, A. M. N., Gava, J. L., Leite, F. P., Andrade, H. B., Alves, J. M., Silva, G. G. C., & Azevedo, M. R. (2010). The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. Forest Ecology and Management, 259(9), 1684–1694. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.01.012

Zanchi, F. B., Waterloo, M. J., Tapia, A. P., Alvarado Barrientos, M. S., Bolson, M. A., Luizão, F. J., Manzi, A. O., & Dolman, A. J. (2015). Water balance, nutrient and carbon export from a heath forest catchment in central Amazonia, Brazil. Hydrological Processes, 29(17), 3633–3648. https://doi.org/10.1002/hyp.10458

4 CAPÍTULO 2[2] – Influência climática na transpiração de clones de híbridos de Eucalipto

[2] Este capítulo está organizado conforme o estilo do periódico *Pesquisa agropecuária Brasileira*, ao qual foi submetido para avaliação e possível publicação.

Resumo

A transpiração das plantas é um processo fisiológico essencial para a regulação climática, desempenhando um papel fundamental no ciclo da água e na manutenção do equilíbrio térmico das plantas. Esse fenômeno é diretamente influenciado por fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa, precipitação e radiação solar. Nesta pesquisa, utilizamos o método de dissipação térmica de Granier para avaliar as taxas de transpiração em dois tipos clonais de eucalipto, o CO 1407 e o VCC 865. O experimento foi conduzido ao longo de três anos, durante os quais sensores de dissipação térmica foram instalados nos troncos das árvores para monitorar o fluxo de seiva e quantificar a transpiração diária. Os resultados indicaram que a transpiração média do clone CO 1407 variou entre 3,4 e 6,7 L dia^{-1}, enquanto no clone VCC 865 as taxas oscilaram entre 7,7 e 8,9 L dia^{-1}. Além disso, observamos que o aumento da precipitação e da umidade relativa reduziu significativamente a transpiração do CO 1407, sugerindo uma maior sensibilidade a esses fatores. No entanto, o clone VCC 865 apresentou maior suscetibilidade às variações de temperatura e radiação fotossinteticamente ativa, de modo que o aumento dessas variáveis resultou no aumento das taxas de transpiração.

Palavras-chave: transpiração, dissipação térmica, granier, clima, Eucalipto

Abstract

Plant transpiration is an essential physiological process for climate regulation, playing a fundamental role in the water cycle and maintaining the plants' thermal balance. This phenomenon is directly influenced by environmental factors such as temperature, relative humidity, precipitation, and solar radiation. In this study, we used the Granier thermal dissipation method to evaluate transpiration rates in two clonal types of eucalyptus, CO 1407 and VCC 865. The experiment was conducted over three years, during which thermal dissipation sensors were installed in the tree trunks to monitor sap flow and quantify daily transpiration. The results indicated that the average transpiration of the CO 1407 clone ranged between 3.4 and 6.7 L day^{-1}, while in the VCC 865 clone, the rates fluctuated between 7.7 and 8.9 L day^{-1}. Additionally, we observed that increased precipitation and relative humidity significantly reduced the transpiration of CO 1407, suggesting greater sensitivity to these factors. However, the VCC 865 clone exhibited higher susceptibility to variations in temperature and photosynthetically active radiation, with increases in these variables leading to higher transpiration rates.

Keywords: transpiration, thermal dissipation, Granier, climate, eucalyptus

Introdução

A água desempenha um papel essencial no funcionamento das florestas, sendo fundamental para o crescimento das plantas e a manutenção dos ecossistemas (Nadzhina et al., 2020). Sua disponibilidade e circulação influenciam diretamente os processos ecológicos, desde a fotossíntese e o transporte de nutrientes até a regulação climática em escalas local e global. Entre os processos a transpiração destaca-se como um mecanismo-chave no ciclo da água nas florestas. Sendo responsável pela perda de cerca de 97% da água absorvida pelas raízes, e desempenhando múltiplas funções, como sustentar o transporte de nutrientes, resfriar as folhas e manter o gradiente hídrico entre o solo e a atmosfera (Taiz e Zeiger, 2017; Hou et al., 2023)

A transpiração também interage de forma dinâmica com fatores ambientais, incluindo precipitação, temperatura, umidade relativa e radiação solar, que regulam a abertura e o fechamento dos estômatos, influenciando diretamente a quantidade de água liberada pelas plantas (Taiz e Zeiger, 2017; Nadzhina et al., 2020; Yao et al., 2023). Compreender a transpiração das espécies é fundamental para caracterizar a eficiência no uso da água (EUA), uma métrica essencial para avaliar o balanço entre a produção de biomassa e o consumo hídrico (Gentilesca et al., 2021). No contexto das mudanças climáticas, a EUA permite estimar a quantidade de água necessária para que os ecossistemas florestais mantenham suas funções e se adaptem a condições ambientais em transformação (Hakamada et al., 2020; Triparna et al., 2023).Os efeitos combinados das mudanças climáticas, das perturbações naturais e antrópicas e das práticas de gestão florestal têm impactado a eficiência hídrica, alterando a dinâmica dos recursos hídricos e a produtividade das florestas (An, 2022; Zhang et al., 2023; Chen et al., 2024).

Estudos sobre a interação entre plantações e os ciclos hídricos regionais são estratégicos para a silvicultura sustentável, especialmente no caso das plantações de eucalipto, reconhecidas por sua alta produtividade. Contudo, essas plantações demandam avaliações detalhadas para equilibrar a produção de biomassa com a conservação dos recursos hídricos (White et al., 2011; Stape et al., 2024; White et al., 2022; Yao et al., 2023; Bastos et al., 2024).

Compreender o uso da água pelas árvores e sua interação com o ambiente é essencial para o desenvolvimento de práticas silviculturais que aliem produtividade, conservação dos recursos hídricos e mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (Tu et al., 2019; Wang et

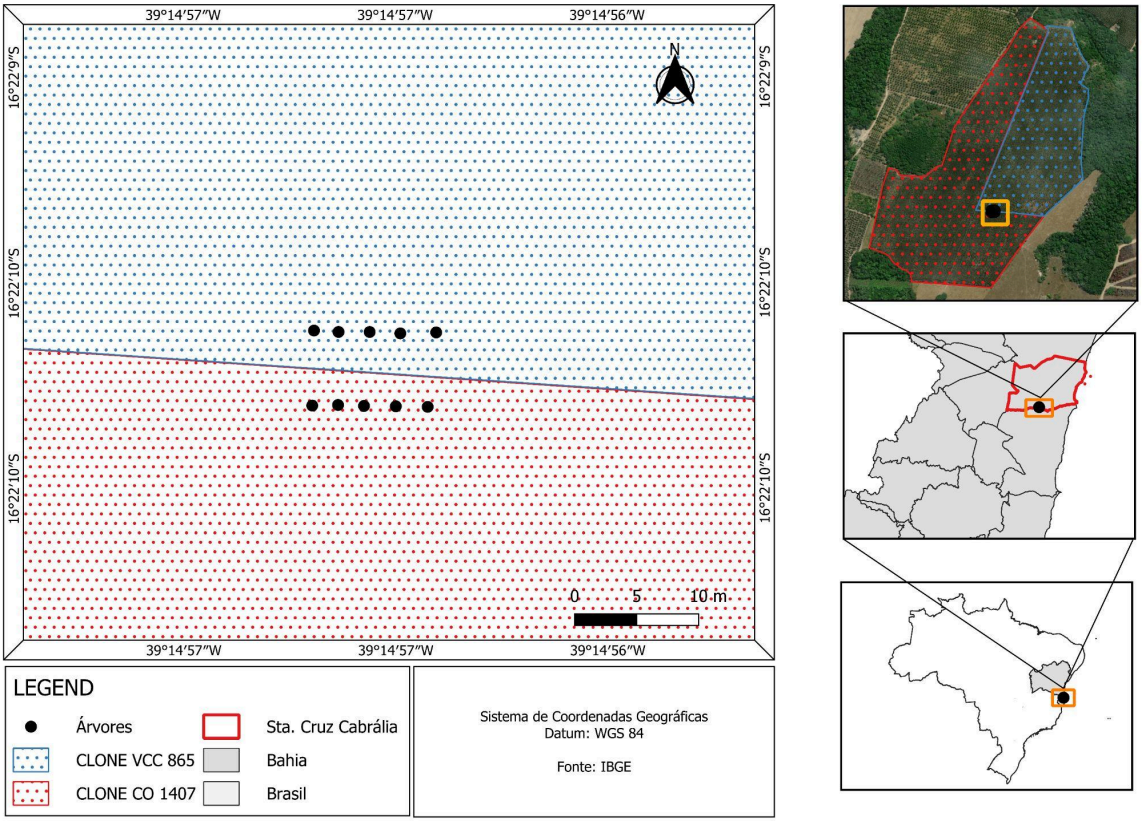
al., 2019; Wu et al., 2021; Yao et al., 2023). Além disso, estudos que avaliam as respostas fisiológicas das árvores às variações ambientais contribuem para a formulação de estratégias adaptativas que promovam o equilíbrio entre produção e conservação. Diante do exposto, este estudo teve como objetivo principal analisar as variações nas taxas de transpiração de dois clones de eucalipto (CO 1407 e VCC 865), ao longo de três anos, relacionando-as a variáveis climáticas como precipitação, temperatura, radiação e umidade relativa.

Material e métodos

Àrea de estudo

A área de estudo está localizada na fazenda Bela Vista, próxima ao povoado de Pindorama, ao longo da BR-367, no município de Porto Seguro, Bahia, nas coordenadas 16°22'50"S e 39°14'17"W. Ela abrange uma área florestal plantada com dois clones híbridos (E. urophylla x E.grandis), CO 1407 e VCC 865, com 6 anos de idade e espaçados em 3,6 m x 2,5 m (Fig. 1). A região é caracterizada por Latossolos Amarelos profundos e bem drenados, típicos de áreas tropicais (Santos et al., 2022). O clima local é classificado como tropical, com uma precipitação média anual de 1.363 mm (Oliveira et al., 2023). As temperaturas médias anuais variam entre 22ºC e 26ºC (Silva et al., 2020).

Figura 1 - Mapa de localização da Fazenda Bela Vista e delineamento experimental das árvores.



Desenho experimental

O monitoramento e a coleta de dados foram realizados entre março de 2022 e junho de 2024, em um cultivo de clones híbridos de *Eucalyptus*, CO 1407 e VCC 865. Para o estudo, foram selecionadas cinco árvores de cada clone, nas quais foram instalados sistemas de medição baseados em sondas permanentemente aquecidas, utilizando o método proposto por Granier (Granier, 1985 e 1987).

As árvores foram perfuradas com uma broca, e, em seguida, foi inserido um tubo de alumínio preenchido com pasta térmica, com o objetivo de homogeneizar a medição e assegurar o contato térmico adequado entre as sondas e o tecido lenhoso. As sondas foram inseridas perpendicularmente aos troncos, na altura do peito (1,30 m), a uma profundidade de 2 cm, alcançando a região do alburno das espécies estudadas. As sondas foram posicionadas na vertical, com espaçamento máximo de 10 cm entre si (Figura 2). O sistema opera por meio do aquecimento constante da sonda superior, alimentada com uma potência elétrica entre 0,2 e 0,4 W, enquanto a sonda inferior, sem aquecimento, registra exclusivamente a temperatura do tronco, refletindo a movimentação da seiva, conforme descrito por Zanchi et al. (2015).

Determinação do fluxo de seiva e transpiração

O cálculo do Fluxo de Seiva (FS) inicia-se pelo cálculo da densidade do fluxo, dado como Ks, de acordo com a equação 1:

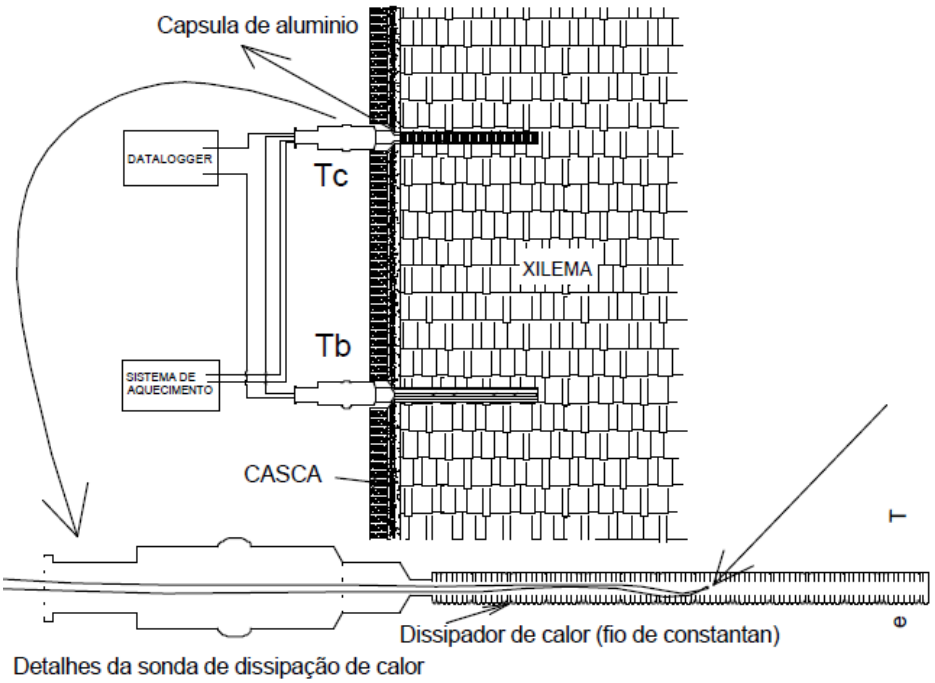
$$K_s = \frac{\Delta Tmax - \Delta Tinst}{\Delta Tinst} \quad (1)$$

onde ΔTmax é a diferença máxima de temperatura entre as duas sondas instaladas nas árvores, que normalmente acontece durante a madrugada; e ΔTinst é diferença de temperatura medida instantaneamente. Desta forma, se obtém o (FS) a partir da Equação 2 (Granier, 1987):

$$(1)\ FS = 0.119 \cdot K_s^{1,231} \cdot A \quad (2)$$

em que A refere-se a área efetiva do xilema em m^2. A área do xilema de cada árvore, onde encontra-se o alburno, é medida levando em consideração o diâmetro da altura do peito (DAP) e a área total do tronco na altura do peito (m^2).

Figura 2 - Esquema de medição do sensor de fluxo de dissipação térmica (Rojas, 2003)



Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-Wilk para avaliar a normalidade das variáveis e o teste de Levene para verificar a homogeneidade. Uma vez satisfeitas as premissas, foram realizadas comparações de médias. O teste t de Student foi aplicado para determinar diferenças significativas entre as médias das amostras. A análise de regressão (R^2) foi utilizada para prever e avaliar a tendência de variação da transpiração com as variáveis climáticas, como precipitação, temperatura, radiação fotossinteticamente ativa e umidade relativa do ar, com o objetivo de compreender a resposta da transpiração sob diferentes condições climáticas durante o período de estudo. As análises estatísticas foram realizadas com o RStudio versão 4.1.3 (RStudio, 2024).

Resultados e Discussão

Observamos nesta pesquisa, que a transpiração média diária das árvores variou significativamente entre os diferentes períodos avaliados. Entre os cultivares, o clone CO 1407 apresentou uma faixa de transpiração média entre 3,4 e 6,7 L dia^{-1} ao longo do experimento, enquanto o clone VCC 865 variou entre 7,7 e 8,9 L dia^{-1}. As maiores taxas de transpiração foram registradas no ano de 2022, 10,6 e 18,0 L dia^{-1} para os clones CO 1407 e VCC 865, respectivamente. Por outro lado, os menores valores médios ocorreram em 2024, com 2,5 L dia^{-1} para o CO 1407, e em 2023, com 3,6 L dia^{-1} para o VCC 865.

Em uma pesquisa realizada na Austrália, Forrester et al. (2010) encontraram, em uma plantação de *E. globulus*, uma faixa de transpiração entre 0,4 e 1,9 L dia^{-1}, valores significativamente inferiores aos observados neste estudo. No Brasil, embora existam poucos estudos sobre a ecofisiologia desse gênero, os resultados encontrados apresentam grande variação, a depender da metodologia, equação empregada e idade das plantas. Gentil (2010), utilizando o mesmo método de Granier (1985 e 1986) em um cultivo do híbrido *E. grandis* × *urophylla* de 4 anos, registrou taxas de transpiração entre 68 e 79 L dia^{-1}. Bellé (2018) observou valores entre 0,7 e 2,6 L dia^{-1} para *E.saligna.* Santos et al. (2024), empregando o método de dissipação térmica com a equação adaptada para *Eucalyptus* proposta por Delgado-Rojas, registraram uma taxa média de transpiração de 41,8 L dia^{-1}, variando entre 12 e 64 L dia^{-1} para o clone CO 1407. No entanto para o clone VCC 865, a média registrada foi de 59,7 L dia^{-1}. Esses valores são notavelmente superiores aos obtidos na presente pesquisa, o que sugere que diferenças metodológicas ou condições ambientais específicas possam ter

influenciado os resultados (Santos et al., 2024). Em outras espécies florestais comerciais, como *Pinus elliottii*, a transpiração é ainda menor, variando entre 0,3 e 1,4 L dia^{-1} (Bellé, 2018).

Tabela 1 - Transpiração média mensal por árvores dos clones CO 1407 e VCC 865 e balanço hídrico para os anos de 2022 a 2024. (DH = déficit hídrico).

2022													
Meses	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total (mm)
P (mm)		89	155,2	95,4	199	34,2	201	104,4	136,4	137	441,2	441,4	2034,2
CO 1407 (mm)	-	297,3	132,4	224,4	175,8	235,6	201,0	206,4	149,8	172,7	146,4	170,4	2112,2
BH (mm)	-	-208,3	22,8	-129,0	23,2	-201,4	0,0	-102,0	-13,4	-35,7	294,8	271,0	-78,0
VCC 865 (mm)	-	505,0	173,4	312,4	189,7	244,4	183,9	189,9	136,4	227,7	183,9	196,2	2542,9
BH (mm)	-	-416,0	-18,2	-217,0	9,3	-210,2	17,1	-85,5	0,0	-90,7	257,3	245,2	-508,7
2023													
P (mm)	95,8	140,8	96,2	361,0	152,6	53,6	110,6	32,8	62,2	35,6	13,0	-	1154,2
CO 1407 (mm)	210,6	231,4	214,8	133,9	165,3	167,4	175,1	321,8	178,8	217,0	208,4	-	2013,9
BH (mm)	-114,8	-90,6	-118,6	227,1	-12,7	-113,8	-64,5	-289,0	-116,6	-181,4	-195,4	-	-955,5
VCC 865 (mm)	444,5	327,4	425,6	201,9	200,9	251,8	178,0	293,0	299,8	113,1	239,7	-	2531,2
BH (mm)	-348,7	-186,6	-329,4	159,1	-48,3	-198,2	-67,4	-260,2	-237,6	-77,5	-226,7	-	-1472,8
2024													
P (mm)	183,0	-	-	225,0	62,0	191,0							478,0
CO 1407 (mm)	77,6	-	-	93,2	157,1	83,8	-	-	-	-	-	-	334,1
BH (mm)	105,4			131,8	-95,1	107,2	-	-	-	-	-	-	143,9
VCC 865 (mm)	175,9	-	-	277,2	278,8	208,3	-	-	-	-	-	-	764,3
BH (mm)	7,1	-	-	-52,2	-216,8	-17,3	-	-	-	-	-	-	-286,3

A transpiração mensal foi estimada com base na média diária das árvores de cada clone. Observamos que as maiores médias de transpiração ocorreram em fevereiro, para o clone VCC 865, 505 mm mês^{-1}, e em agosto, para o clone CO 1407, com 321,8 L árvore^{-1} mês^{-1} (Tabela 1), este período é caracterizado por baixos índices pluviométricos na região (Oliveira et al., 2023). Além disso, observamos taxas reduzidas de transpiração em novembro e dezembro de 2022, em razão do fenômeno climático La Niña, que resultou em precipitações mais elevadas na região e, consequentemente, em uma redução da transpiração (Oliveira et

al., 2023). As diferenças nas taxas de transpiração entre os clones aumentou ao longo do tempo, em que o VCC 865 teve taxas de transpiração 20,4, 25,7 e 128,8% superiores aos observados no clone CO 1407, nos anos de 2022, 2023 e 2024, respectivamente. A perda anual de água por transpiração dos clones foi superior à observada em pesquisas anteriores, como a de Hakamada et al., que relataram taxas variando entre 550 e 1.039 mm ano^{-1} para híbridos de *E. grandis* × *urophylla* e entre 550 e 650 mm ano^{-1} para híbridos de *E. grandis* × *camaldulensis*. No entanto, inferiores aos encontrados por Santos et al. (2024), que registraram perdas de 16.738 mm ano^{-1} e 11.695 mm ano^{-1} para os clones CO 1407 e VCC 865, respectivamente.

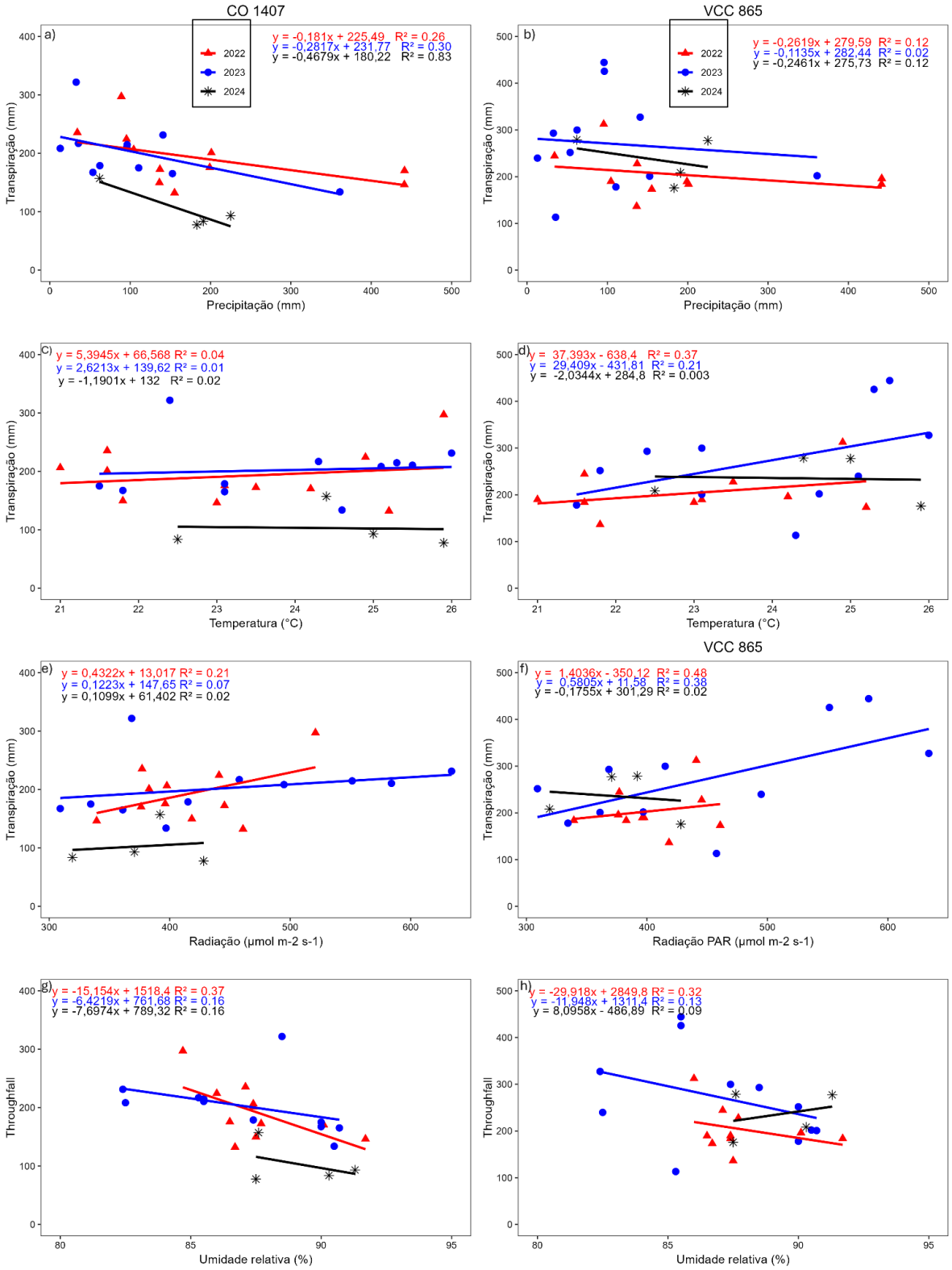
Observamos que, nos anos de 2022 e 2023, apesar de 2022 ter registrado um volume total de precipitação elevado (Tabela 1), ocorreram períodos mais críticos de déficit hídrico (DH), como em fevereiro e junho, para ambos os clones. O clone VCC 865 apresentou déficits mais intensos em vários meses, indicando a necessidade de maior demanda hídrica. Em 2023, a redução da precipitação (Tabela 1) resultou em um DH ainda mais elevado, especialmente entre agosto e novembro, e um déficit total anual de -955,5 mm e -1472,8 mm para o CO 1407 e o VCC 865, respectivamente. Em 2024, mesmo com volumes razoáveis de precipitação nos primeiros meses do ano, observamos que CO 1407 teve menor demanda hídrica e um balanço positivo, em comparação ao VCC 865, que registrou um déficit expressivo de -286,3 mm durante o período avaliado.

A precipitação é uma variável fundamental para a regulação das taxas de transpiração das plantas (Taiz et al., 2017; Sadok et al., 2020; Chia et al., 2022). Pesquisas anteriores identificaram a precipitação como um dos principais preditores da redução da transpiração, evidenciando sua influência direta nos processos fisiológicos relacionados à regulação hídrica. Santos et al. (2024) relataram que essa variável foi responsável por explicar 65% da variabilidade na transpiração, indicando uma relação inversa entre precipitação e perda de água pelas plantas. Observamos que, em ambos os clones, o aumento da precipitação esteve diretamente relacionado com a redução da transpiração (Fig. 3a e 3b). Notamos também, que a precipitação influenciou significativamente ($p < 0,05$) a dinâmica de transpiração do clone CO 1407. O modelo indica um aumento na correlação ao longos dos anos de 2022 ($R^2 = 0,26$), 2023 ($R^2 = 0,30$), e uma maior correlação em 2024 ($R^2 = 0,83$), indicando que a resposta da transpiração ao aumento da precipitação se intensificou ao longo do tempo. Porém, para o VCC 865, a relação entre a precipitação e transpiração não foi estatisticamente significativa ($p>0,05$) nos três anos avaliados. Essas diferenças entre os clones podem ser atribuídas a adaptações fisiológicas específicas, refletindo estratégias distintas de uso e

conservação da água. Resultado assim, maior suscetibilidade do CO 1407 às variações pluviométricas, e maior estabilidade do VCC 865, indicando um mecanismo mais eficiente de regulação hídrica (Chia et al., 2022; Zhu et al., 2022).

Outro fator determinante para avaliar a dinâmica da transpiração é a temperatura. Estudos indicam que a temperaturas elevadas são um dos principais fatores responsáveis pelo aumento das taxas de transpiração das plantas, uma vez que intensificam a evaporação da água por meio dos estômatos (Taiz et al., 2017; Sadok et al., 2020; Chia et al., 2022; Zhu et al., 2022). Porém, esse aumento, embora essencial para o resfriamento das folhas, pode resultar em perdas excessivas de água, em condições de temperaturas mais amenas, podendo levar ao estresse hídrico em ambientes quentes e secos (Taiz et al., 2017; Sadok et al., 2020; Kaptein et al., 2023) Observamos que (Figura 3c) no clone CO 1407, que a transpiração, não respondeu diretamente às variações de temperatura ($p>0,05$), sugerindo que este tipo clonal pode ser mais adaptado a ambientes mais quentes. No entanto, no clone VCC 865 (Figura 3d), a resposta da transpiração ao aumento da temperatura foi mais pronunciada, indicando uma maior suscetibilidade. Santos et al. (2024), relataram em seu estudo, que a transpiração dos clones CO 1407 e VCC 865, não responderam significativamente aos estímulos térmicos em análises isoladas. Sugerindo que a transpiração desses clones pode ser modulada por um conjunto de fatores ambientais, como umidade relativa do ar, disponibilidade hídrica no solo ou radiação solar, os quais podem atuar de forma sinérgica com a temperatura, influenciando as respostas fisiológicas.

Figura 2 - Relação linear entre a transpiração média mensal dos clones e as variáveis climáticas para os anos entre 2022 a 2024.



A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) corresponde à faixa do espectro eletromagnético (400–700 nm) utilizada pelas plantas como fonte de energia para o processo fotossintético, sendo, fundamental para o crescimento e desenvolvimento vegetal (Mõttus et al., 2012). Além de sua função primária na fotossíntese, a radiação PAR atua diretamente

sobre a abertura dos estômatos, influenciando a condutância estomática e, consequentemente, a taxa de transpiração (Pieruschka et al., 2010; Saini & Frickie, 2020). Observamos (Fig. 2e e 2f) uma tendência de aumento na transpiração de ambos os clones, em resposta ao aumento da PAR. No entanto, o efeito foi mais intenso, no clone VCC 865 (Fig. 2f), que demonstrou uma maior sensibilidade à radiação em comparação ao CO 1407 (Fig. 2e). Esse padrão pode estar relacionado a características morfofisiológicas específicas do clone, como a densidade e distribuição de estômatos, espessura da epiderme e ângulo foliar, que influenciam a interceptação e absorção da luz (Pezzopane et al., 2002; Silva et al., 2015).Em outros estudos, foram encontrados resultados semelhantes aos observados nesta pesquisa. Pezzopane et al. (2002), relataram um aumento significativo na transpiração de Siparuna guianensis sob alta intensidade de PAR, em áreas de dossel aberto, com exposição direta à radiação solar e em ambientes sombreados, com radiação difusa. Esses achados corroboram a hipótese de que a radiação, além de estimular a fotossíntese, desempenha papel determinante na regulação hídrica das plantas por meio do controle estomático. As diferentes respostas dos clones sugerem que o VCC 865 pode ser menos eficiente no uso da água em ambientes com alta incidência luminosa, o que deve ser considerado em estratégias de manejo e seleção de variedades para regiões tropicais ou subtropicais com alta radiação solar.

A umidade relativa do ar (UR) influencia diretamente a transpiração das plantas, devido ao seu papel na regulação do déficit de pressão de vapor (DPV) entre a superfície foliar e a atmosfera. O DPV representa o gradiente entre a pressão de vapor da água dentro da folha e a do ar circundante, sendo um dos principais vetores da difusão de vapor d'água para o ambiente (Taiz et al., 2017). Em condições de baixa UR, esse gradiente aumenta, intensificando a perda de água pela via estomática, podendo ocasionar desidratação celular e estresse hídrico. Contudo, ambientes com alta UR atenuam o DPV, reduzindo a transpiração e o resfriamento evaporativo das folhas (Chia et al., 2022; Zhu et al., 2022). Observamos (Fig. 2h e 2i) que essa relação foi mais evidente em 2022 para ambos os clones. Neste período a UR apresentou maior amplitude de variação. Portanto, a diminuição da transpiração nesse ano está diretamente associada ao aumento da umidade relativa. Nos anos subsequentes (2023 e 2024), esse efeito foi menos expressivo, o que pode ser atribuído à menor variabilidade climática observada ou à interação entre a UR e outros fatores ambientais, como a radiação fotossinteticamente ativa e a temperatura. É importante destacar que a UR atua de forma sinérgica com essas variáveis, sendo o seu impacto na transpiração ampliado ou reduzindo esta variável (Mahajan et al. 2008). Santos et al. (2024), identificaram um comportamento semelhante em clones de *Eucalyptus*, com redução significativa das taxas de transpiração em

resposta ao aumento da UR. Mahajan et al. (2008), relataram que a UR foi a variável com maior impacto direto sobre a transpiração, superando inclusive o efeito isolado da temperatura. Esses achados reforçam o papel determinante da UR na regulação hídrica das plantas, especialmente em ambientes tropicais e subtropicais (Santos et al., 2024). A incorporação dessas variáveis pode contribuir para aprimorar a acurácia das estimativas relacionadas ao consumo hídrico das árvores, fornecendo subsídios mais robustos para o manejo eficiente dos recursos naturais em plantações florestais, atuando como como parâmetros de entrada em modelos de simulação aplicados à silvicultura comercial.

Conclusão

Observamos nesta pesquisa, que as taxas de transpiração média foram maiores no clone VCC 865 em comparação ao CO 1407, mas ainda assim, menores que o estimado para outros cultivos na região. Notamos também que o clone CO 1407 apresentou maior sensibilidade às variações de precipitação e umidade relativa do ar, enquanto o clone VCC 865 respondeu de forma mais significativa às variações de temperatura e radiação fotossinteticamente ativa.

A maior transpiração observada no clone VCC 865 sugere uma demanda de água mais elevada em cenários de aumento de temperatura. Esse comportamento pode impactar a eficiência do uso da água e a resiliência deste clone em ambientes mais quentes e sujeitos a restrições hídricas.

Referências

An, X. (2022). Responses of Water Use Efficiency to climate change in evapotranspiration and transpiration ecosystems. Ecological Indicators, 141(109157), 109157. doi:10.1016/j.ecolind.2022.109157

Bastos, F., de Deus Júnior, J. C., Ebling, É. D., Neumann, M., & Reichert, J. M. (2024). Efficiency of water use by Eucalyptus spp. for water conservation and sustainable forest production. Journal Des Sciences Hydrologiques [Hydrological Sciences Journal], 69(7), 844–860. doi:10.1080/02626667.2024.2339909

Bellé, P. A. (2018). Crescimento e consumo hídrico de Pinus sp e Eucalyptus saligna Sm. em diferentes condições ambientais. Universidade Federal de Santa Maria .

Chen, J., Pu, J., Li, J., & Zhang, T. (2024). Response of carbon- and water-use efficiency to climate change and human activities in China. Ecological Indicators, 160(111829), 111829. doi:10.1016/j.ecolind.2024.111829

Chia, S. Y., & Lim, M. W. (2022). A critical review on the influence of humidity for plant growth forecasting. IOP conference series. Materials science and engineering, 1257(1), 012001. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1257/1/012001

Forrester, D. I., Collopy, J. J., & Morris, J. D. (2010). Transpiration along an age series of Eucalyptus globulus plantations in southeastern Australia. Forest Ecology and Management, 259(9), 1754–1760. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.023

Gentilesca, T., Battipaglia, G., Borghetti, M., Colangelo, M., Altieri, S., Ferrara, A. M. S., … Ripullone, F. (2021). Evaluating growth and intrinsic water-use efficiency in hardwood and conifer mixed plantations. Trees (Berlin, Germany: West), 35(4), 1329–1340. doi:10.1007/s00468-021-02120-z

Hakamada, R. E., Hubbard, R. M., Moreira, G. G., Stape, J. L., Campoe, O., & Ferraz, S. F. de B. (2020). Influence of stand density on growth and water use efficiency in Eucalyptus clones. Forest Ecology and Management, 466(118125), 118125. doi:10.1016/j.foreco.2020.118125

Hatfield, J. L., & Dold, C. (2019). Water-use efficiency: Advances and challenges in a changing climate. Frontiers in Plant Science, 10, 103. doi:10.3389/fpls.2019.00103

Hou, P., Chen, D., Wei, X., Hu, X., Duan, X., Zhang, J., … Zhang, L. (2023). Transpiration characteristics and environmental controls of orange orchards in the dry-hot valley region of southwest China. Agricultural Water Management, 288(108467), 108467. doi:10.1016/j.agwat.2023.108467

Kaptein, N. D., Everson, C. S., Clulow, A. D., Toucher, M. L., & Germishuizen, I. (2023). Transpiration rates from mature Eucalyptus grandis × E. nitens clonal hybrid and Pinus elliottii plantations near the Two Streams Research Catchment, South Africa. Hydrology and Earth System Sciences, 27(24), 4467–4484. https://doi.org/10.5194/hess-27-4467-2023

Liu, Z., Ji, X., Ye, L., & Jiang, J. (2022). Inherent water-use efficiency of different forest ecosystems and its relations to climatic variables. Forests, 13(5), 775. doi:10.3390/f13050775

Lin, X., Wu, B., Wang, J., Wang, G., Chen, Z., Liang, Y., … Wang, H. (2023). Effects of geographical and climatic factors on the intrinsic water use efficiency of tropical plants: Evidence from leaf 13C. Plants, 12(4). doi:10.3390/plants12040951

Lv, Y., Gu, L., Man, R., Liu, X., & Xu, J. (2024). Response of stomatal conductance, transpiration, and photosynthesis to light and CO2 for rice leaves with different appearance days. Frontiers in Plant Science, 15, 1397948. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1397948

Mõttus, M., Frederic, B., Lopez-Lozano, R., & Sulev, M. (2011). Photosynthetically Active Radiation: Measurement and Modeling. Em R. Meyers (Org.), Encyclopedia of Sustainability Science and Technology (p. 7970–8000).

Mahajan, P. V., Oliveira, F. A. R., & Macedo, I. (2008). Effect of temperature and humidity on the transpiration rate of the whole mushrooms. Journal of Food Engineering, 84(2), 281–288. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.05.021

Oliveira, A. G., Zanchi, F. B., & Vieira, C. H. N. (2023). Incidência e padrões pluviométricos no sul do nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Geografia Física, 16(6), 3548–3559. https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.6.p3548-3559

Oliveira, A. G. de, Coelho, J. R. de M., & Zanchi, F. B. (2024). Thirty-one years of land use, coverage, and occupation in the municipality of Santa Cruz Cabrália, Bahia. Revista de Geografia, 41(5), 19–29. https://doi.org/10.51359/2238-6211.2024.262433

Pinto, O. B., Jr, Vourlitis, G. L., Sanches, L., Dalmagro, H. J., Lobo, F. de A., & Nogueira, J. de S. (2013). Transpiração pelo método da sonda de dissipação térmica em floresta de transição Amazônica-Cerrado. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering, 17(3), 268–274. doi:10.1590/s1415-43662013000300004

Pieruschka, R., Huber, G., & Berry, J. A. (2010). Control of transpiration by radiation. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107(30), 13372–13377. https://doi.org/10.1073/pnas.0913177107

Puchi, P. F., Dalmonech, D., Vangi, E., Battipaglia, G., Tognetti, R., & Collalti, A. (2024). Contrasting patterns of water use efficiency and annual radial growth among European beech forests along the Italian peninsula. Scientific Reports, 14(1), 6526. doi:10.1038/s41598-024-57293-7

Reichert, J. M., Prevedello, J., Gubiani, P. I., Vogelmann, E. S., Reinert, D. J., Consensa, C. O. B., … Srinivasan, R. (2021). Eucalyptus tree stockings effect on water balance and use efficiency in subtropical sandy soil. Forest Ecology and Management, 497(119473), 119473. doi:10.1016/j.foreco.2021.119473

Rojas, J. S. D. (2003). Avaliação do uso do fluxo de seiva e da variação do diâmetro do caule e de ramos na determinação das condições hídricas de citros, como base para o manejo de irrigação. 2003. Universidade de São Paulo.

Saini, G., & Fricke, W. (2020). Photosynthetically active radiation impacts significantly on root and cell hydraulics in barley (Hordeum vulgare L.). Physiologia Plantarum, 170(3), 357–372. https://doi.org/10.1111/ppl.13164

Sadok, W., Lopez, J. R., & Smith, K. P. (2021). Transpiration increases under high-temperature stress: Potential mechanisms, trade-offs and prospects for crop resilience in a warming world. Plant, Cell & Environment, 44(7), 2102–2116. https://doi.org/10.1111/pce.13970

Silva, G. M. de F., Nascimento Lopes, E. R., Zanchi, F. B., & Silva, J.B.L,. (2020). Divisão fisiográfica da bacia do rio Buranhém como subsídio para o planejamento e gestão dos recursos hídricos. Gaia scientia, 14(4). https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2020v14n4.51802

Song, L., Zhu, J., Zheng, X., Li, X., Wang, K., Zhang, J., … Sun, H. (2023). Water use dynamics of trees in a Pinus tabuliformis plantation in semiarid sandy regions, Northeast China. Agricultural Water Management, 275(107995), 107995. doi:10.1016/j.agwat.2022.107995

Stape, J. L., Binkley, D., Ryan, M. G., & Do Nascimento Gomes, A. (2004). Water use, water limitation, and water use efficiency in a Eucalyptus plantation. Bosque, 25(2),35-41.

Vellame, L. M., Coelho Filho, M. A., & Paz, V. P. S. (2009). Transpiração em mangueira pelo método Granier. Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental/Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering, 13(5), 516–523. doi:10.1590/s1415-43662009000500002

Yao, Y., Huang, J., He, W., Zhu, J., & Li, Y. (2023). Changes in water-use efficiency of Eucalyptus plantations and its driving factors in a small county in South China. Water, 15(15), 2754. doi:10.3390/w15152754

Wang, Y., Cao, G., Wang, Y., Webb, A. A., Yu, P., & Wang, X. (2019). Response of the daily transpiration of a larch plantation to variation in potential evaporation, leaf area index and soil moisture. Scientific Reports, 9(1), 4697. doi:10.1038/s41598-019-41186-1

White, D. A., Silberstein, R. P., Balocchi-Contreras, F., Quiroga, J. J., Meason, D. F., Palma, J. H. N., & Ramírez de Arellano, P. (2021). Growth, water use, and water use efficiency of Eucalyptus globulus and Pinus radiata plantations compared with natural stands of Roble-Hualo forest in the coastal mountains of central Chile. Forest Ecology and Management, 501(119676), 119676. doi:10.1016/j.foreco.2021.119676

Zanchi, F. B., Waterloo, M. J., Tapia, A. P., Alvarado Barrientos, M. S., Bolson, M. A., Luizão, F. J., Manzi, A. O., & Dolman, A. J. (2015). Water balance, nutrient and carbon export from a heath forest catchment in central Amazonia, Brazil: NUTRIENT AND CARBON EXPORT FROM CAMPINA FOREST. Hydrological processes, 29(17), 3633–3648. https://doi.org/10.1002/hyp.10458

Zhang, Z., Zhang, L., Xu, H., Creed, I. F., Blanco, J. A., Wei, X., … Bishop, K. (2023). Forest water-use efficiency: Effects of climate change and management on the coupling of carbon and water processes. Forest Ecology and Management, 534(120853), 120853. doi:10.1016/j.foreco.2023.120853

Zhu, Y., Cheng, Z., Feng, K., Chen, Z., Cao, C., Huang, J., Ye, H., & Gao, Y. (2022). Influencing factors for transpiration rate: A numerical simulation of an individual leaf system. Thermal Science and Engineering Progress, 27(101110), 101110. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101110

4 CAPÍTULO 3[3] – Ciclagem de nutrientes em um cultivo de clones híbridos de Eucalipto

[3] Este capítulo está organizado conforme o estilo do periódico *New Forests*, ao qual será submetido para avaliação e possível publicação.

Resumo

Este estudo avaliou a dinâmica da produção de serapilheira, decomposição e liberação de nutrientes em dois clones híbridos de *Eucalyptus grandis* × *urophylla* (CO 1407 e VCC 865), cultivados no sul da Bahia. A pesquisa foi conduzida em campo utilizando coletores para quantificar a produção mensal de serapilheira e o método litterbag para avaliar a decomposição ao longo de 360 dias. A análise de nutrientes foi realizada por espectrometria de emissão atômica com plasma de micro-ondas (MP-AES). Os resultados mostraram que o clone VCC 865 apresentou maior produção de biomassa (12.846,5 kg ha^{-1} ano^{-1}), aporte de nutrientes e taxa de decomposição (k = 0,22 $mês^{-1}$), enquanto o CO 1407 apresentou menor produção (6.560,3 kg ha^{-1} ano^{-1}), mas maior eficiência na liberação de nutrientes, particularmente Na (94,26%). A decomposição foi mais intensa durante os primeiros 60 dias. A produção de serapilheira foi influenciada por variáveis climáticas, como precipitação e vento, com impactos distintos nos clones. O acúmulo e a liberação de nutrientes variaram, com o clone CO 1407 sendo mais eficiente na ciclagem de nutrientes essenciais, enquanto no VCC 865 houve acúmulo em todos os elementos. O estudo destaca os papéis diferenciados dos clones na ciclagem biogeoquímica, com implicações para a fertilidade do solo, o manejo florestal e as estratégias de mitigação climática. Os resultados sugerem que o VCC 865 é mais adequado para sistemas que priorizam a produção e o acúmulo de nutrientes, enquanto o CO 1407 pode ser vantajoso para a rápida liberação de nutrientes em solos de baixa fertilidade.

Palavras-chave: ciclagem de nutrientes, eucalipto, decomposição, nutrientes, biomassa

Abstract

Nutrient cycling is a fundamental process for the sustainability of forest plantations, directly influencing productivity and soil conservation. This study evaluated nutrient cycling in two eucalyptus clones by analyzing the decomposition rate, litter production, nutrient input, and release. Litter production was quantified monthly using collectors, allowing the estimation of organic matter input into the soil, and nutrient input was also quantified in the leaf, branch, and reproductive structure components of the litter. The order of highest nutrient inputs was Ca > N > Mg > K > Fe > P > Mn > Na for clone VCC 865 and K > N > Ca > Fe > Mg > Na > P > Mn for clone CO 1407. Litter decomposition was assessed using litterbags, monitoring mass loss over 60, 120, 180, 240, 300, and 360 days, and nutrient release was determined by mass loss and residual nutrient content at each collection. The results indicated that clone VCC 865 has a higher potential for biomass production, nutrient input, and a faster

decomposition rate compared to CO 1407. The decomposition rates (k) were 0.16 and 0.22 month^{-1}. Meanwhile, CO 1407 was more efficient in nutrient release. Sodium was the most efficiently released element in both clones.
Keywords: nutrient cycling, eucalyptus, decomposition, nutrients, biomass

Introdução

Em ecossistemas florestais, a serapilheira, composta por folhas, galhos, ramos, sementes e frutos senescentes, desempenha um papel fundamental no retorno de nutrientes ao solo. Esse material atua como fonte de matéria orgânica e contribui para a ciclagem de nutrientes essenciais, como nitrogênio (N) e fósforo (P), além de participar do ciclo do carbono, sustentando a produtividade e a resiliência das florestas. Após sua deposição no solo, a serapilheira passa por um processo natural de decomposição, influenciado por diversos fatores ambientais, incluindo condições climáticas, propriedades do solo, atividade microbiana e composição química, como o teor de lignina (Lili et al., 2024). Estudos recentes, indicam que em regiões com altas temperaturas e precipitações intensas, a decomposição ocorre de forma acelerada, pois o ambiente quente e úmido favorece a atividade dos organismos decompositores, resultando em uma liberação mais rápida de nutrientes para o solo (Baietto et al., 2021; Huang et al., 2022). No entanto, mudanças nos padrões de temperatura e precipitação podem alterar a taxa de decomposição e o balanço de nutrientes no solo. Além disso, práticas de manejo inadequadas interferem na produção e composição da serrapilheira, afetando a proporção de nutrientes liberados durante sua decomposição (Kong et al., 2022). A redução das taxas de decomposição pode retardar a formação de matéria orgânica no solo, modificar a estequiometria de C, N e P e impactar a dinâmica do carbono do solo, comprometendo, a longo prazo, o papel das florestas como sumidouros de carbono (Hurteau, 2020; Liu et al., 2022).

Os nutrientes liberados durante a decomposição da serrapilheira representam uma fonte primária de nutrientes para as raízes das plantas (Holanda et al., 2017; Montañez et al., 2023; Asigbaase et al., 2023). Contudo, a imobilização temporária desses nutrientes no solo pode limitar sua disponibilidade para as plantas, afetando o crescimento e a saúde do ecossistema (Baietto et al., 2021). O equilíbrio entre a entrada e a liberação de nutrientes indica que perturbações no ciclo natural das florestas podem impactar significativamente o armazenamento de carbono na biomassa (Sayer et al., 2024). A relevância desse ciclo torna-se

ainda mais evidente diante das mudanças climáticas e das práticas de manejo florestal. Fatores antropogênicos têm alterado os ciclos biogeoquímicos globais e o clima, gerando incertezas crescentes quanto às condições ambientais futuras e impactando diretamente o funcionamento das florestas e os serviços ecossistêmicos que elas fornecem (Andrés, 2019). Além disso, as condições ambientais influenciam as interações entre espécies e os efeitos combinados do aumento da concentração de CO_2, da maior frequência e intensidade de secas e das altas taxas de deposição de N, alterando a dinâmica populacional e comunitária. Essas interações complexas entre os impactos das mudanças globais também afetam os processos ecossistêmicos que regulam a transferência de matéria e o ciclo de nutrientes, ressaltando a importância de estudos que utilizem abordagens empíricas e de modelagem (Andrés, 2019; Broadbent et al., 2024; Zhang et al., 2024).

Além do papel ecológico, as florestas plantadas são fundamentais para a economia, oferecendo benefícios ambientais, como a redução da pressão sobre florestas naturais e o sequestro de carbono atmosférico, contribuindo para a mitigação do aquecimento global (Lebenya et al., 2018; Beslity et al., 2022). No entanto, essas plantações, especialmente em regiões tropicais, enfrentam o desafio de se desenvolverem em solos intemperizados e de baixa fertilidade, o que levanta preocupações sobre a sustentabilidade de florestas altamente produtivas (Laclau et al., 2010; Santos et al., 2017; Caldeira et al., 2023). O gênero *Eucalyptus* é um dos mais cultivados nessas regiões, reconhecido por sua alta produtividade, resiliência a solos inférteis e rápido crescimento (Zhang et al., 2021). No Brasil, representa 76% das áreas de florestas plantadas, cobrindo aproximadamente 7,8 milhões de hectares (IBÁ, 2024; Oliveira et al., 2024). Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar e comparar a dinâmica da produção, decomposição e eficiência de liberação de nutrientes da serapilheira em uma plantação de clones híbridos de *E. grandis* × *urophylla* (CO 1407 e VCC 865) na região do extremo sul da Bahia.

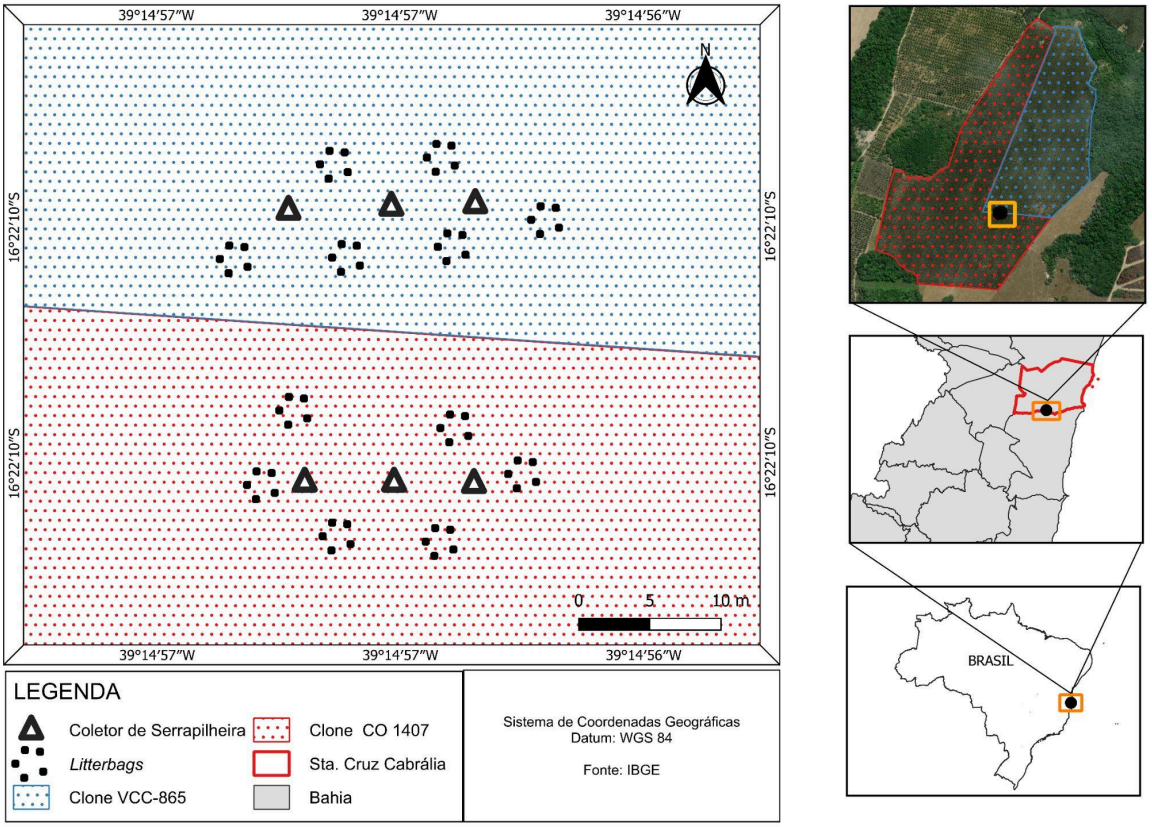
Material e métodos

Àrea de estudo

O experimento foi conduzido na Fazenda Bela Vista, localizada às margens da BR-367, entre os municípios de Porto Seguro e Santa Cruz de Cabrália, no Extremo Sul da Bahia, nas coordenadas geográficas 16°22'14.286"S e 39°14'59.211"W (Fig. 1). A

precipitação média anual da região é de 1363 mm, caracterizada por um período chuvoso, com pico em novembro, e outro seco, com menor volume de chuvas em fevereiro (Oliveira et al., 2023). As temperaturas médias anuais variam entre 22°C e 26°C (Silva et al., 2020). A área do experimento possui aproximadamente 58 hectares e é composta por clones híbridos CO 1407 e VCC 865 (*E. grandis* × *urophylla*), com espaçamento de plantio de 3,6 m x 2,5 m entre os clones.

Figura 1 - Mapa de localização da Fazenda Bela Vista e delineamento experimental.



Metodologia

Produção da serrapilheira

A produção de serrapilheira foi estimada por meio da distribuição aleatória de seis coletores de 1 m², confeccionados com tela de náilon (sombrite) e posicionados a 30 cm acima do solo. As coletas foram realizadas mensalmente, e as amostras foram separadas em frações de folhas, galhos e estruturas reprodutivas. Em laboratório, as amostras foram secas

em estufa a 70°C para remover a umidade e, em seguida, pesadas em balança analítica com precisão de 0,1 g (Antoneli et al., 2012). A produção por hectare foi estimada utilizando a equação 1.

$$PMS = (PSC \times 10.000)/AC$$

Em que:

PMS = Produção mensal da serrapilheira (kg ha-¹)
PSC = Serapilheira média dos coletores (kg m²)
AC = Área do coletor

Decomposição

A dinâmica de decomposição da serapilheira foi avaliada pelo método de litterbags, utilizando 60 sacos de malha com abertura de 1 mm. Cada saco continha 5,75 g de folhas senescentes previamente secas em estufa a 70°C e foi distribuído aleatoriamente no campo, com 30 unidades por clone (Bocock e Gilbert, 1957), organizadas em seis grupos de cinco unidades. As coletas foram realizadas em intervalos de 60, 120, 180, 240, 300 e 360 dias (Pech et al., 2021). Em cada intervalo, cinco sacos foram retirados aleatoriamente, e o material coletado foi levado ao laboratório para triagem e remoção da microfauna. Posteriormente, as amostras foram secas, e o peso seco foi determinado em balança analítica com precisão de 0,1 g.

A perda de peso seco da serapilheira foi calculada utilizando o modelo de Guo et al., 1999, de acordo com a equação 2:

$$L(\%) = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

A taxa de decomposição da serapilheira foi modelada de forma exponencial (Olson, 1963), de acordo com a equação 3:

$$w_t = w_0 e^{-kt} \quad (3)$$

onde W_0 é a massa seca inicial da serrapilheira, W_t é a massa final no tempo (em anos), t é o tempo de incubação e k é a constante instantânea de decomposição anual.

Análise química

O teor de nitrogênio foi quantificado por digestão sulfúrica, utilizando o método de Kjeldahl (Bataglia et al., 1983). Para os demais elementos (P, K, Ca, Mg, Fe, Mn e Na), foram utilizados reagentes com grau de pureza analítica e na preparação das soluções, água ultrapura com uma resistividade de 18,2 MΩ cm-1, obtida de um sistema de purificação da *Rephile* (modelo Direct Pure Adept). Todos os frascos e vidrarias utilizados na coleta foram previamente descontaminados por imersão em soluções de HNO3 10% v/v durante 24 horas, seguidas de enxágue com água ultrapura. Para a etapa de digestão ácida em bloco digestor foram utilizados 200mg de amostras da serapilheira. Foi adicionado ao tubo de digestão 1 mL de HNO3 (sigma aldrich, 65%) por 24 horas e após adicionado mais 1 mL de ácido nítrico, 1 mL de peróxido de hidrogênio (H2O2) 30%, mantidos a uma temperatura constante de 120°C, após o resfriamento, os extratos foram diluídos até um volume final de 25 mL, adaptado do método utilizado por Costa et al., (2018). O mesmo tratamento foi aplicado ao material de referência certificado da EMBRAPA ,RM-Agro E1001a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, para fins de estudar a exatidão do método de digestão.

Instrumentação

A determinação multielementar de P, K, Ca, Mg, Fe, Mn e Na em amostras de folhas, após digestão em bloco, foi realizada por Espectrometria de emissão ótica com plasma induzido por micro-ondas (MIP OES), modelo MP-AES 4210 (*Agilent Technologies*, Melbourne, Austrália), com um monocromador Czerny-Turner, equipado com um nebulizador OneNeb, câmara de nebulização e tocha de quartzo. O gás nitrogênio (N_2) utilizado no plasma foi produzido a partir do ar atmosférico por meio de um gerador de N_2 (modelo 4107 Agilent). O equipamento é configurado com um sistema manual de injeção de amostras e os parâmetros instrumentais e configurações para cada encontram-se no material suplementar. A otimização das condições de análise foi realizada automaticamente pelo software MP Expert (versão 1.5.1.0, Agilent Technologies, Melbourne, Austrália), o qual seleciona as condições ótimas de fluxo para nebulização e o posicionamento mais adequado do espelho de pré-óptica do equipamento, visando obter o maior sinal possível do analito.

A liberação de nutrientes foi calculada utilizando a equação 3:

(4)

$$R(\%) = \frac{W_0C_0 - W_tC_t}{W_0C_0} \times 100$$

Onde, Wt, W0 e *t* são os mesmos da fórmula para *k*; C_0 e C_t representam, respectivamente, a concentração inicial de nutrientes e a concentração de nutrientes no momento da amostragem *t*.

Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos utilizados neste estudo foram gentilmente cedidos pela empresa Veracel. Essas informações foram coletadas na estação meteorológica EMA 10, situada na Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Veracel, nas proximidades do sítio experimental. As variáveis analisadas incluem precipitação, evapotranspiração, temperatura, velocidade média do vento, umidade relativa do ar e radiação solar.

Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de Shapiro-wilk para testar a normalidade das variáveis e o teste de Levene para homogeneidade, atendida as premissas, procedeu-se à comparação de médias. O teste t de Student foi utilizado para determinar se diferenças significativas entre as médias das amostras. Utilizou-se também a correlação de Pearson (r), para avaliar a relação da serrapilheira e as variáveis climáticas com nível de significância α= 0.05. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software RStudio 4.1.3 (RStudio, 2024).

Resultados

A produção de serapilheira ao longo do tempo apresentou variação significativa entre as frações analisadas, com diferenças entre os clones e picos sazonais de deposição. Observamos que a maior queda de serapilheira para o clone CO 1407 ocorreu em julho, com

entrada de 842,6 kg ha^{-1} de biomassa seca, enquanto, para o clone VCC 865, a maior produção foi registrada em setembro, com aproximadamente 1669,7 kg ha^{-1}. No acumulado anual, a produção total de biomassa seca do VCC 865 foi de 12.846,5 kg ha^{-1}, cerca de 95,8% maior que a observada para o CO 1407, que totalizou 6.560,3 kg ha^{-1}. Foi constatado que as folhas representaram o principal componente da serapilheira total em ambos os clones (Tabela 1). Além disso, não foi registrada a queda de estruturas reprodutivas para o clone CO 1407 em nenhuma das coletas.

Tabela 1 - Produção mensal da serrapilheira (kg ha^{-1}) e a contribuição de cada uma das frações (%) para os clones CO 1407 e VCC 865

	CO 1407				**VCC 865**					
Meses	Folhas	(%)	Galhos	(%)	Folhas	(%)	Galhos	(%)	E. Reprodutivas	(%)
Julho	725,2	86,1	117,4	13,9	1155,1	90,3	79,3	6,2	44,6	3,5
Agosto	541,2	83,4	108,0	16,6	1011,0	84,0	169,8	14,1	22,3	1,9
Setembro	427,1	70,0	182,7	30,0	779,5	46,7	836,3	50,1	53,9	3,2
Outubro	481,3	80,4	117,5	19,6	609,2	60,6	381,0	37,9	15,2	1,5
Novembro	582,9	73,4	211,4	26,6	629,9	74,3	204,9	24,2	13,3	1,6
Dezembro	406,0	53,9	347,0	46,1	607,0	67,1	298,0	32,9	SD	SD
Janeiro	232,5	66,6	116,4	33,4	243,1	59,8	163,3	40,2	SD	SD
Fevereiro	237,2	79,4	61,5	20,6	822,6	80,4	171,3	16,7	29,6	2,9
Março	293,5	83,9	56,2	16,1	982,2	89,0	121,8	11,0	SD	SD
Abril	363,0	88,7	46,1	11,3	1175,8	84,4	209,0	15,0	8,7	0,6
Maio	510,6	91,7	46,3	8,3	919,3	80,7	209,5	18,4	11,1	1,0
Junho	241,8	69,2	107,7	30,8	653,4	75,2	208,4	24,0	7,3	0,8
Total	5042,2		1518,1		9588,1		3052,5		205,9	

Conforme apresentado na Tabela 2, entre as variáveis climáticas analisadas, a precipitação influenciou negativamente a queda da serapilheira no clone CO 1407, enquanto a velocidade do vento exerceu uma influência positiva ($p < 0,05$). Os efeitos das demais variáveis climáticas não foram significativos ($p > 0,05$).

Ao considerar os componentes da serapilheira separadamente para este clone, a precipitação e a temperatura apresentaram influência negativa sobre a queda de folhas. Para os galhos, a velocidade do vento demonstrou um efeito positivo ($p < 0,05$), enquanto as demais variáveis não apresentaram efeitos significativos ($p > 0,05$). No caso do clone VCC 865, foram observados efeitos significativos das variáveis climáticas para os componentes da serapilheira ($p < 0,05$).

Tabela 2 - Estatística descritiva da correlação linear entre os componentes da serapilheira e as variáveis meteorológicas. Valores seguidos de * indicam significância a 5%, enquanto valores seguidos de ** indicam significância a 1%.

			CO 1407	
Variáveis climáticas	Serapilheira	Folhas	Galhos	Estruturas reprodutivas
Precipitação (mm)	-0,68**	-0,63*	-0,38	NA
Temperatura (°C)	-0,49	-0,63*	0,03	NA
Velocidade do vento (m~s)	0,63*	0,37	0,75**	NA
Radiação solar	-0,01	-0,08	0,46	NA
			VCC 865	
Variáveis climáticas	Serapilheira	Folhas	Galhos	Estruturas reprodutivas
Precipitação (mm)	-0,17	0,02	-0,27	-0,17
Temperatura (°C)	-0,49	-0,37	-0,21	-0,52
Velocidade do vento (m~s)	-0,18	-0,54	0,44	0,25
Radiação solar	-0,27	-0,45	0,16	0,05

No apêndice A, S1 e S2 apresentam os parâmetros analíticos do procedimento proposto e os parâmetros operacionais do MP OES. Os limites de quantificação (LOQs) foram adequados para a determinação de elementos nas amostras, variando de Na, Ca, K, Mg, Mn, P e Fe. A precisão (repetibilidade) foi considerada adequada, com RSDs inferiores a 10 % para todos os elementos. A exatidão foi avaliada por meio da digestão do material de referência certificado da EMBRAPA ,RM-Agro E1001a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu com valores de recuperação de 70 a 100%. Assim, concluímos que o procedimento proposto pode ser aplicado com eficiência para a determinação de Na, Ca, K, Mg, Mn, P e Fe em amostras de tecido vegetal.

Conforme apresentado na Tabela 3, observa-se a contribuição anual de nutrientes nas diferentes frações da serapilheira dos clones estudados. O clone VCC 865 demonstrou maior potencial para a entrada de todos os elementos avaliados, com exceção do Na. As folhas destacaram-se como o componente responsável pelas maiores entradas de nutrientes, seguidas pelos galhos e, em menor proporção, as estruturas reprodutivas. Sendo a ordem de entrada dos elementos foi Ca > N > Mg > K > Fe > P > Mn > Na para o clone VCC 865 e K > N > Ca > Fe > Mg > Na > P > Mn para o clone CO 1407.

Tabela 3 - Entrada anual de nutrientes e sódio (kg ha^{-1}) nas diferentes frações da serapilheira dos clones CO 1407 e VCC 865.

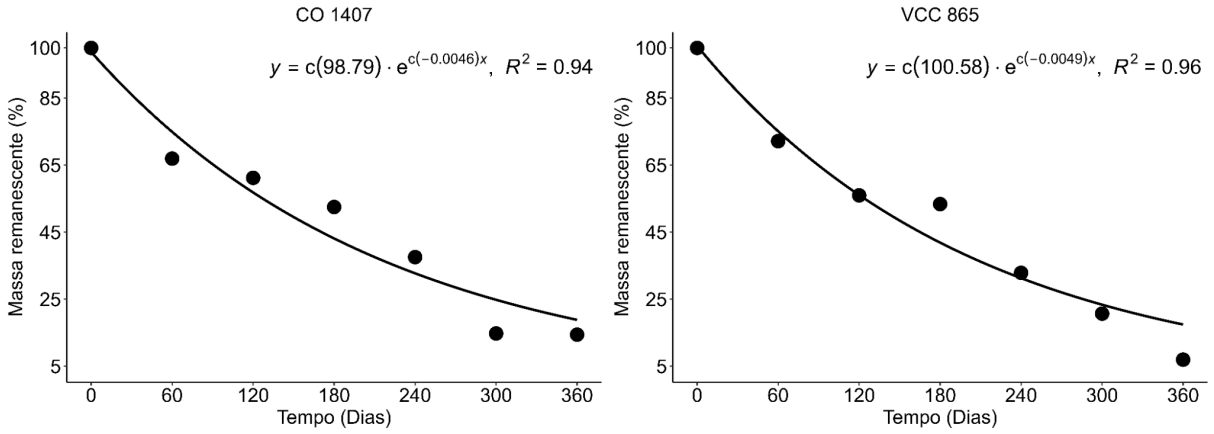
	Nutrientes e Sódio kg ha^{-1}							
VCC 865	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Na
Folhas	44,67	8,66	14,20	51,69	16,22	13,19	6,90	7,35
Galhos	4,51	2,75	3,96	8,94	2,46	4,51	2,16	1,44
E. Reprodutivas	0,60	0,19	0,66	0,65	0,30	0,30	0,15	0,20
Total	49,78	11,60	18,82	61,27	18,99	18,00	9,21	9,00
CO 1407								
Folhas	23,27	4,55	29,84	10,49	8,15	7,41	3,65	6,80
Galhos	3,04	1,37	2,63	4,12	1,06	1,90	1,07	0,80
Total	26,31	5,92	32,47	14,60	9,21	9,31	4,72	7,60

3.3 Dinâmica da decomposição da serapilheira e liberação de nutrientes

As maiores perdas de massa para ambos os clones ocorreram nos primeiros 60 dias, com valores de 33,04% e 27,8%, respectivamente (Figura 2). No entanto, as menores perdas foram registradas na fase final da decomposição, aos 360 dias, para o clone CO 1407 (0,35%), e no meio do experimento, aos 180 dias, para o clone VCC 865 (2,61%). A massa remanescente após 360 dias de monitoramento foi de 14,4% para o clone CO 1407 e 6,96% para o VCC 865.

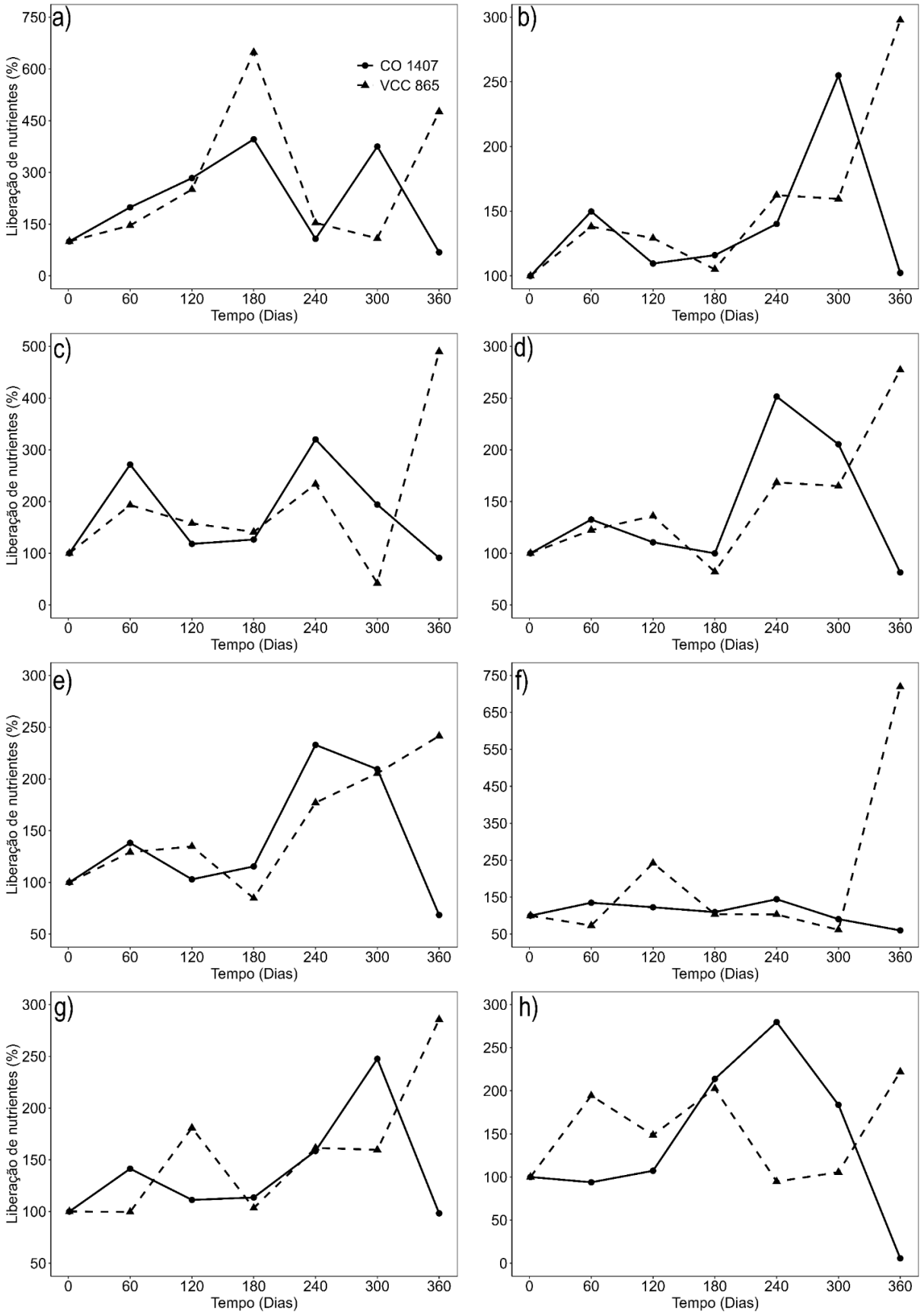
Dessa forma, após um ano de decomposição, a massa decomposta da serapilheira foliar foi de 85,57% no clone CO 1407 e 93,04% no clone VCC 865. As taxas de decomposição (*k*) foram de 0,16 e 0,22g mês^{-1} para os clones CO 1407 e VCC 865, respectivamente.

Figura 2 - Dinâmica da decomposição dos clones CO 1407 e VCC 865 durante 360 dias de decomposição.



Conforme observado na Figura 3, no clone CO 1407, houve acúmulo de todos os elementos, exceto Na, durante os primeiros 60 dias. Ao longo do processo de decomposição, ao longo dos 360 dias de observação, houve alternância entre perdas e acúmulos de nutrientes. Ao final do experimento, o clone CO 1407 apresentou liberações de 31,7%, 18,5%, 39,9%, 8,9%, 31,5%, 94,3% e 1,8% para N, K, Ca, Mg, Na, Fe e Mn, respectivamente. Apenas P apresentou acúmulo de 2,3% em relação à concentração inicial de nutrientes. No clone VCC 865, a dinâmica foi diferente, com acúmulos de 376,0%, 197,7%, 389,8%, 177,2%, 141,5%, 619,4%, 185,6% e 122,1% para N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn e Na, respectivamente.

Figura 3 – Liberação de nutrientes e sódio durante a decomposição da serrapilheira para os clones CO 1407 e VCC 865. (a) nitrogênio, (b) fósforo, (c) potássio, (d) cálcio, (e) magnésio, (f) ferro, (g) manganês e (h) sódio.


a)
b)
c)
d)
e)
f)
g)
h)
CO 1407
VCC 865
Liberação de nutrientes (%)
Tempo (Dias)

Discussão

Embora submetidos às mesmas condições ambientais, as características individuais do clone VCC 865 favoreceram uma maior produção de serapilheira em relação ao clone CO 1407. As folhas foram o componente mais representativo na formação de matéria orgânica em ambos os clones, constituindo a principal fonte de entrada de nutrientes para o solo. Esse resultado corrobora estudos anteriores realizados para o gênero (Corrêa et al., 2013; Vieira et al., 2014; Oliveira et al., 2020; Moura et al., 2022) e para outros tipos de florestas (Sloboda et al., 2017; Valadão et al., 2019). Em florestas plantadas, a produção de serapilheira pode atingir valores de até 7,1 Mg ha^{-1} ano^{-1} para *Pinus* sp., 7,4 Mg ha^{-1} ano^{-1} para híbridos de *E. urophylla* × *globulus*, 5,2 Mg ha^{-1} ano^{-1} para *E. urophylla* e 1,8 Mg ha^{-1} ano^{-1} para Pterogyne nitens Tul. (Piovesan et al., 2012; Schumacher et al., 2023). Em florestas naturais, foram relatadas produções de 6,1 Mg ha^{-1} ano^{-1} para Floresta Ombrófila Mista Densa (Antoneli e Thomaz, 2012), 3,8 Mg ha^{-1} ano^{-1} para áreas de Caatinga (Holanda et al., 2017) e 5,4 Mg ha^{-1} ano^{-1} para a Floresta Estacional Semidecidual Montana (Santos Neto et al., 2015). Compreender essa dinâmica é essencial para o planejamento de estratégias de conservação e produção, especialmente porque a serapilheira desempenha um papel no acúmulo de carbono no solo, contribuindo diretamente para a mitigação das mudanças climáticas ao armazenar carbono que, de outra forma, seria liberado como CO_2 na atmosfera (Rábula et al., 2022; Liu et al., 2023).

O comportamento das florestas é fortemente influenciado pelo clima. Variáveis como precipitação, radiação solar e temperatura atuam como reguladores e limitantes de processos ecológicos, incluindo a produção de serapilheira. Essas variáveis controlam tanto a quantidade quanto a qualidade da serapilheira produzida, impactando diretamente o ciclo de nutrientes e a regeneração do solo (Giweta, 2020; Rocha et al., 2020; Ribeiro et al., 2022; Zhang et al., 2024). Além disso, o microclima local pode modificar esses processos ao influenciar a composição e estrutura das comunidades florestais. Mudanças no microclima, como variações de temperatura, umidade ou disponibilidade de luz, podem gerar efeitos cumulativos a longo prazo, transformando padrões de produtividade, biodiversidade e resiliência dessas comunidades (Giweta, 2020; Kang et al., 2024). Esse conjunto de interações reforça a importância de compreender a dinâmica climática em diferentes escalas, principalmente em relação à adaptação para a conservação e manejo das florestas, especialmente em um contexto de mudanças climáticas globais.

Nesta pesquisa, constatamos um efeito negativo do aumento da precipitação sobre a queda de folhas no clone CO 1407. Esses resultados sugerem que a adaptação deste clone é no

aumento da senescência foliar durante períodos de menor pluviosidade o que pode representar uma estratégia adaptativa das plantas para minimizar os efeitos do estresse hídrico, reduzindo a superfície transpirante e ajudando a planta a tolerar ou evitar condições de escassez de água (Cianciaruso et al., 2006; Giacomo et al., 2012; Kang et al., 2024). Além disso, a temperatura demonstrou ser um forte preditor na dinâmica de queda de folhas do clone CO 1407. Embora estudos indiquem que temperaturas mais elevadas podem estar associadas a maior produção foliar em algumas regiões (Momolli et al., 2019; Liu et al., 2024), observamos uma resposta inversa nesse clone. Por outro lado, observamos que, apesar da tendência de aumento da deposição de serapilheira em condições de baixa precipitação e temperaturas elevadas, essa relação não apresentou significância estatística para o clone VCC 865. Esse resultado sugere que fatores adicionais podem estar influenciando a resposta desse clone às variações climáticas.

Diversos estudos têm relatado que a velocidade do vento é um dos principais fatores que influenciam a queda, distribuição e produção de serapilheira (Luo et al., 2021; Liu et al., 2024). Nesta pesquisa, ao avaliar os componentes da serapilheira de forma individual, constatamos que a velocidade do vento exerceu um efeito positivo sobre a produção de biomassa de galhos do clone CO 1407. No entanto, no clone VCC 865, observou-se uma tendência de redução na queda de folhas e galhos associada à velocidade do vento, mas essa relação não foi estatisticamente significativa.De forma semelhante, a radiação solar é constantemente relatada como um fator influente na dinâmica da serapilheira, com estudos indicando picos de produção durante períodos de alta irradiação solar, o que sugere uma estratégia adaptativa para renovação foliar e otimização da fotossíntese (Giweta, 2020; Guzmán et al., 2023). Contudo, nesta pesquisa, embora tenha sido observada uma tendência de redução na queda de folhas em ambos os clones, as respostas não foram suficientemente consistentes para comprovação estatística. Embora modelos de estimativa de queda de serapilheira baseados exclusivamente em preditores climáticos apresentem alta precisão, a inclusão de variáveis bióticas, como características genéticas, estágio de desenvolvimento das plantas e interações ecológicas, é fundamental para aumentar a representatividade e a abrangência desses modelos (Giweta, 2020; Baietto et al., 2024).

O N é um dos nutrientes mais importantes para o crescimento, expansão foliar e produção de biomassa em espécies florestais, além de ser um componente fundamental para os aminoácidos, que atuam na construção de enzimas e proteínas nas plantas. No entanto, seu déficit pode resultar em sérias dificuldades no crescimento e desenvolvimento de espécies florestais (Anas et al., 2020; Zayed et al., 2023). Observamos aqui, que as maiores entradas de

N ocorreram no VCC 865, o que pode contribuir para uma maior fertilidade do solo em que este clone está estabelecido, influenciando positivamente para um melhor desenvolvimento e um crescimento mais vigoroso a longo prazo, em comparação ao CO 1407 (Anas et al., 2020; Zayed et al., 2023). A menor produção de serapilheira observada no clone CO 1407 (Tabela 2) resultou em uma menor entrada de N no solo, o que pode resultar em um crescimento mais lento e afetar diretamente a sua produtividade (Zayed et al., 2023). Os resultados encontrados nesta pesquisa, corroboram com outros estudos para o gênero no Brasil, em que a entrada deste elemento, variou entre 39.4 e 90,7 kg ha^{-1} em diferentes tipos cultivares (Vieira et al., 2014; Ribeiro et al., 2022), e também para outros tipos de florestas plantadas para a produção de madeira, como na Corymbia citriodora, em que a entrada deste elemento foi de 21,2 kg ha^{-1} (Carvalho et al., 2016).

Embora seja o nutriente em menor quantidade nas plantas, o P é extremamente importante, sendo um elemento estrutural dos ácidos nucleicos, envolvidos na transferência de energia, e como componente dos fosfatos de adenosina e na transferência de carboidratos entre organelas nas células foliares (Hawkesford et al. 2023). Compreender a dinâmica deste elemento, é muito importante, pois o excesso de P nas plantas pode ocasionar alterações moleculares e fisiológicas, como a modulação da expressão genética, processo pelo qual a atividade dos genes é aumentada, diminuída ou regulada, de forma que pode influenciar a produção de proteínas e, consequentemente, as funções celulares e o aumento das taxas fotossintéticas, fundamental para o crescimento das plantas, pois proporciona maior produção de energia e biomassa, no entanto, embora promova crescimento e mudanças na arquitetura da raiz, também pode causar desequilíbrios nutricionais, estresse oxidativo e afetar associações micorrízicas (Khan et al. 2023). Os resultados desta pesquisa, revelam que a concentração de P foi semelhante em ambos os clones, sendo a maior entrada pelo VCC 865 proporcional a produção de serapilheira (Tabela 1 e 2). Comparando com outros estudos, observamos que as concentrações encontradas são superiores aos encontrados para o gênero (Vieira et al., 2022) e florestas naturais (Ribeiro et al., 2022)

Alguns processos fisiológicos e bioquímicos nas plantas, são modulados pela entrada de K, essencial para a osmorregulação, extensão celular, controle da abertura e fechamento dos estômatos, processos esses, primordiais para a manutenção e eficiência no uso da água, além disso, o K influencia diretamente na carga de sacarose e taxa de movimentação de solutos, mediados pelo fluxo de massa dentro da planta, essenciais para um transporte eficiente de nutrientes e assimilados. Contudo, a deficiência deste elemento pode ocasionar um aumento na resistência da condutância estomática, limitando a difusão de CO^2 através dos

estômatos, impactando negativamente o processo de fotossíntese e o crescimento vegetal (Kalaji et al., 2014; Sardans et al., 2021; Tavakol et al., 2022; Hawkesford et al., 2023). A maior entrada de K no clone CO 1407 pode refletir uma adaptação fisiológica mais vantajosa, contribuindo para um desempenho funcional superior em comparação ao VCC 865 (Sardans et al., 2021). Apesar da maior produção de serapilheira ter sido observada no VCC 865, a concentração de K no CO 1407 foi duas vezes maior. Esses resultados, sugerem que o CO 1407 pode ser mais eficiente na absorção ou retenção deste elemento, o que pode influenciar positivamente nos processos que dependem de K. Em outros estudos, a entrada de K no solo variou entre 4,0 a 44,4 kg ha^{-1} em diferentes cultivares (Vieira et al., 2014; Ribeiro et al., 2022), que estão em consonância com os resultados que encontramos nesta pesquisa.

Outros processos fisiológicos, como a estabilização da parede celular e das membranas, são modulados pelo Ca, incluindo também, atividades de osmorregulação e atuação como segundo mensageiro, permitindo às plantas regularem suas respostas aos estímulos ambientais de maneira mais eficiente (Hawkesford et al., 2023). Quando as plantas sofrem deficiência de Ca, são fortemente impactadas na integridade estrutural e funcional de seus tecidos, comprometendo sua resistência a estresses bióticos, além de torná-las mais vulneráveis ao ataque de patógenos (Thor, 2019). Portanto, a maior entrada de Ca pela serapilheira para o VCC 865, cerca de cinco vezes mais que o CO 1407, sugere que este pode ter uma maior eficiência na ciclagem deste elemento, refletindo em maior resistência deste clone em relação a estresses ambientais e patogênicos (Thor, 2019). Considerando, ainda que a importância do Ca não reflete apenas no vigor da planta, mas também na saúde do solo, devido ao seu papel neutralização de acidez e melhoria da disponibilidade de outros nutrientes (Yu et al., 2023), evidenciamos o potencial de adaptação deste clone a estresses ambientais, como, variações no regime hídrico, tornando-se uma opção promissora para o desenvolvimento de silvicultura mais sustentável e produtiva na região (Thor, 2019; Tong et al., 2021; Negi et al., 2023). Em outras pesquisas, o Ca também foi o elemento de maior abundância na serapilheira para o gênero (Viera et al., 2014; Carvalho et al., 2019; Ribeiro et al., 2022) e também em outras espécies florestais (Carvalho et al., 2019).

O Mg, é um nutriente, que atua no funcionamento do metabolismo das plantas, como componente estrutural da molécula de clorofila, tornando-se indispensável no processo de fotossíntese, além disso, exerce funções determinantes nas plantas, como o transporte de fotoassimilados, importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas, e também, na síntese de proteínas, processos que sustentam a formação de biomassa e a regulação metabólica (Hawkesford et al., 2023). A deficiência desse elemento compromete o

crescimento e desenvolvimento das plantas, impactando negativamente a produtividade dos ecossistemas florestais. No entanto, tem se notado que a escassez deste nutriente no solo, tem se tornado cada vez mais comum, especialmente em solos intemperizados e suscetíveis à lixiviação, e sendo ainda mais agravado, em sistemas de manejo intensivo do solo, onde a fertilização se limita apenas a N, P e K (Barbosa et al., 2019). Observamos nesta pesquisa, que o clone VCC 865 demonstrou uma maior capacidade de ciclagem deste nutriente. Os resultados encontrados nesta pesquisa, são bem próximos aos relatados em outros estudos, onde a entrada de K via serapilheira. variou entre 8,0 e 15,7 kg ha^{-1} para o gênero *Eucalyptus* (Viera et al., 2014; Ribeiro et al., 2022).

Apesar de não ser classificado como um nutriente essencial para a maioria das plantas, por não atender aos critérios de essencialidade universal, que exigem ser indispensável ao ciclo de vida da planta e insubstituível por outro elemento (Maathuis, 2014), o Na, é um dos elementos mais estudados na biologia vegetal, devido às suas propriedades tóxicas em concentrações elevadas (Kronzucker, 2013). Seu papel nas plantas é mais complexo, sendo simultaneamente benéfico e tóxico, dependendo das condições e das espécies envolvidas (Maathuis, 2014). Em contextos específicos, o Na pode exercer funções complementares ao K, substituindo-o parcialmente em alguns processos metabólicos. Estudos demonstram que, em algumas espécies, como as do gênero *Eucalyptus*, a suplementação de Na em quantidades reduzidas pode minimizar os sintomas de deficiência de K quando seu fornecimento é limitado, evidenciando seu potencial funcional e aumentando a eficiência do K no solo (Wakeel et al., 2011). Nesta pesquisa, notamos que a entrada de Na para o VCC 865 foi menor comparado aos nutrientes, este comportamento também foi observado por Sloboda et al., (2017).

Ainda que encontrados em pequenas quantidades, os micronutrientes, são fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. O fornecimento equilibrado e o manejo adequado desses nutrientes são indispensáveis, para promover o crescimento, maturação das plantas e maximizar o seu rendimento (Ahmed et al., 2024). Por exemplo, o Mn é extremamente importante para o crescimento das plantas, pois está envolvido na estrutura de proteínas e enzimas fotossintéticas (Chrysargyris et al. 2022), além de ser um elemento chave no ciclo de nutrientes, pois influencia diretamente no estágio final da decomposição da serapilheira (Wu et al., 2022). Outro micronutriente fundamental é o Fe, que está envolvido nos processos metabólicos das plantas e atividades fisiológicas, como a síntese de clorofila, fotossíntese e respiração. Atua também, como componente de diversas enzimas, incluindo os citocromos da cadeia de transporte de elétrons, sendo necessário para diversas

funções biológicas. Em florestas, o papel do Fe é extremamente importante, principalmente nas atividades de decomposição do ciclo de nutrientes, devido a sua influência na dinâmica química e biológica do solo (Routh e Sahoo, 2015). Neste estudo, observamos, que a entrada de Mn e Fe, foram semelhantes, com concentrações próximas em ambos os clones, no entanto, a maior entrada deste elemento pelo VCC 865,está diretamente associada a maior produção de serapilheira deste clone (Tabela 3 e 5). Sugerindo que, assim como ocorreu para N, P, Ca, Mg, a menor produção de serapilheira no CO 1407 pode limitar a disponibilidade destes micronutrientes, impactando negativamente seu desempenho produtivo ao longo ciclo de crescimento (Anas et al., 2020; Chrysargyris et al. 2022; Hawkesford et al., 2023; Ahmed et al., 2024).

Os resultados desta pesquisa mostraram que, em ambos os clones, as maiores perdas de massa foram registradas nos primeiros 60 dias. Apesar de uma baixa redução na decomposição nos estágios finais do CO 1407, o VCC 865, por outro lado, apresentou altas taxas de decomposição nesse período. A decomposição da serapilheira inicia-se com a lixiviação, processo no qual nutrientes e compostos orgânicos se dissolvem na água e são transportados para o solo (Zanchi et al., 2011). Estudos sugerem que as taxas de decomposição mais baixas nos estágios finais podem refletir a redução na qualidade do substrato, devido à remoção do carbono lábil e ao acúmulo de matéria recalcitrante na massa residual da serapilheira (Guo et al., 1999; Demessie et al., 2012; Giweta et al., 2020). Em florestas da Amazônia Central, Zanchi et al. (2011) observaram altas reduções no primeiro mês em floresta ripária, com cerca de 25% da biomassa individual perdida, enquanto na floresta de campina apenas 35% da biomassa foi perdida ao longo do primeiro ano.

As taxas de decomposição encontradas nesta pesquisa, são mais elevadas em comparação a outros estudos para o gênero, que variaram de 0,05 a 0,12 mês $^{-1}$ para diferentes espécies e tipos clonais (Demessie et al., 2012; Pinto et al., 2016; Ribeiro et al., 2022). E também maiores que as encontradas para florestas naturais, onde a constante de decomposição variou ainda mais, devido às diferentes condições edafoclimáticas em que estão estabelecidas. Em Florestas sazonais semidecídua, foram relatadas valores k entre 0,08 e 0,12 mês $^{-1}$ (Bauer et al., 2017; Costa et al., 2019), para Floresta Estacional Semidecidual Montana, o valor k encontrado foi de 0,05 mês $^{-1}$ (Pinto et al., 2016). As altas taxas de decomposição observadas nos clones estudados, em especial o VCC 865, representam um importante diferencial para sistemas florestais produtivos que visam ao aumento da ciclagem de nutrientes e à manutenção da fertilidade do solo. Considerando o contexto atual de mudanças climáticas e pressões sobre os recursos naturais, identificar cultivares com maior capacidade de retorno de

nutrientes ao solo, é fundamental para práticas de manejo mais sustentáveis (Andrés, 2019; Ribeiro et al., 2022; Sayer et al., 2024; Zhang et al., 2024)

Os diferentes padrões no comportamento durante a decomposição, indicam que as características individuais dos clones, como a composição química, além das características do solo em que estão estabelecidos, e a interação com fatores ambientais, podem influenciar o ciclo biogeoquímico desses clones (Dent et al., 2006; Bueis et al., 2018). Os resultados observados, apontam para uma maior imobilização de alguns nutrientes-chave no VCC 865, e uma maior liberação no CO 1407. Essas diferenças podem implicar diretamente na fertilidade do solo e na sustentabilidade da plantação, principalmente em relação ao manejo e manutenção da produtividade a longo prazo. Um dos fatores que podem ter contribuído para a maior eficiência na liberação de nutrientes pelo clone CO 1407 é a menor disponibilidade inicial de nutrientes no solo em que está estabelecido, isto porque em ambientes com menor fertilidade, as perdas de nutrientes da serapilheira tendem a ser mais rápidas, pois a competição por nutrientes recém-liberados entre plantas e microrganismos é mais intensa do que em quando comparado a ambientes onde há uma maior concentração de nutrientes (Dent et al., 2006). No entanto, os nutrientes provenientes de folhas em decomposição podem se tornar parcialmente indisponíveis devido a processos simultâneos, como imobilização microbiana, percolação em águas subterrâneas, volatilização ou até neutralização por meio de adições externas, como a deposição atmosférica (Bueis et al., 2018; Pérez et al., 2021).

Para N e P (Fig. 3a e 3b), observamos uma alternância entre imobilização e liberação em ambos os clones. No final do experimento, o CO 1407 liberou cerca de um terço do N inicial, enquanto no VCC 865 houve um aumento na concentração, indicando imobilização microbiana. Estudos anteriores relatam comportamentos semelhantes para o gênero (Vieira et al., 2014; Baieto et al., 2021). O K, altamente suscetível à lixiviação, teve liberação baixa no CO 1407 e acúmulo no VCC 865 ao longo do ano de observação (Fig. 3c), divergindo de estudos prévios (Ferreira et al., 2016; Moura et al., 2022). O Ca, por sua função estrutural, apresentou baixa taxa de liberação, com valores de 18,51% para o CO 1407 e 4,58% para o VCC 865, alinhando-se às expectativas teóricas (Ferreira et al., 2016). O Mg acumulou-se durante a decomposição, mas foi liberado significativamente após 360 dias, comportamento também relatado para outras espécies florestais (Goya et al., 2008; Baieto et al., 2021).

O Na é um elemento frequentemente negligenciado em pesquisas científicas que avaliam a liberação de nutrientes, conforme apontado por Pérez et al. (2021), Baieto et al. (2021) e Ribeiro et al. (2022). Apesar disso, este estudo destaca a importância de considerar a dinâmica deste elemento, evidenciando sua eficiência na liberação durante o processo de

decomposição da serapilheira. Estes resultados são inéditos para o gênero e representam um avanço no entendimento da dinâmica deste nutriente. Os resultados demonstraram que a maior eficiência de liberação do Na foi observada no clone CO 1407 (Fig. 3h), cerca de 94,26% liberado ao longo dos 360 dias de decomposição. No entanto, observamos que no VCC 865, apenas 23,56% deste elemento foi liberado no ambiente. Essas diferenças ressaltam a influência das características específicas de cada clone na dinâmica de liberação de nutrientes, sugerindo que interações ecológicas podem ser fundamentais para regular este comportamento. A inclusão desse elemento é essencial para um entendimento mais abrangente dos ciclos biogeoquímicos, considerando seu potencial na substituição parcial do K em determinados processos metabólicos, conforme sugerido por Wakeel et al. (2011).

O comportamento dos micronutrientes durante o processo de decomposição, indicou uma alta liberação de Fe no CO 1407, enquanto para VCC 865, houve um aumento substancial na concentração desse elemento. Esse comportamento, assim como observamos para N, P, e K, também está associado ao processo de imobilização. Ainda assim, o enriquecimento de Fe na serapilheira (Fig. 3f) remanescente sugere uma alta adsorção de ferro proveniente do solo circundante na superfície da serapilheira em decomposição (Baieto et al., 2021). No entanto, observamos que dentre todos os elementos avaliados nesta pesquisa, as variações do Mn (Fig. 3g), foram as mais conservadas e semelhantes para os dois clones, liberando apenas 1,76 e 1,69% para o CO 1407 e VCC 865, respectivamente. Essa estabilidade sugere que os processos envolvidos na decomposição da serapilheira e na liberação de Mn podem ser menos influenciados pela composição química da serapilheira ou pelas interações ecológicas. Baieto et al. (2021), relataram aumento na concentração de Mn para *P. taeda*, enquanto este elemento permaneceu estável para E. grandis.

Conclusões

Os resultados desta pesquisa indicam um maior potencial do VCC 865 na produção de biomassa e na incorporação de nutrientes, tornando-o uma opção favorável à fertilidade do solo. Por outro lado, a menor produção de serapilheira no CO 1407 pode restringir a disponibilidade de nutrientes essenciais, como N, P, Ca e Mg, comprometendo o desempenho produtivo da cultura ao longo de seu ciclo de crescimento.

Este estudo demonstrou que os clones CO 1407 e VCC 865 adotam estratégias distintas de resposta às variáveis climáticas, evidenciando mecanismos diferenciados de

adaptação. O clone CO 1407 apresentou maior sensibilidade a ventos fortes e à baixa precipitação, enquanto o aumento da temperatura parece atenuar a senescência foliar. Por sua vez, o clone VCC 865 mostrou menor reatividade às variações climáticas imediatas. Nenhum dos clones apresentou correlação significativa com a radiação solar, sugerindo que essa variável não influencia diretamente a queda da serapilheira.

As taxas de decomposição indicam que o clone VCC 865 é mais eficiente na decomposição da serapilheira. E em ambos os clones, essas taxas foram superiores às observadas em outras pesquisas sobre o gênero. O CO 1407 é o clone com maior eficiência na liberação de nutrientes. Sendo o fósforo o único nutriente que acumulou durante a decomposição de serapilheira do CO 1407, e o ferro o nutriente com maior acúmulo no VCC 865. O sódio foi o elemento com maior eficiência de liberação em ambos os clones, sendo este um achado inédito para o gênero. Os resultados apresentados, contribuem para o avanço do conhecimento sobre as respostas fenológicas desses clones em diferentes condições ambientais, oferecendo subsídios relevantes para estratégias de produtividade, manejo e conservação frente às mudanças climáticas.

Referências

Anas, M., Liao, F., Verma, K. K., Sarwar, M. A., Mahmood, A., Chen, Z.-L., … Li, Y.-R. (2020). Fate of nitrogen in agriculture and environment: agronomic, eco-physiological and molecular approaches to improve nitrogen use efficiency. Biological Research, 53(1), 47. doi:10.1186/s40659-020-00312-4

Ahmed, N., Zhang, B., Chachar, Z., Li, J., Xiao, G., Wang, Q., … Tu, P. (2024). Micronutrients and their effects on Horticultural crop quality, productivity and sustainability. Scientia Horticulturae, 323(112512), 112512. doi:10.1016/j.scienta.2023.112512

Asigbaase, M., Dawoe, E., Lomax, B. H., & Sjogersten, S. (2021). Temporal changes in litterfall and potential nutrient return in cocoa agroforestry systems under organic and conventional management, Ghana. Heliyon, 7(10), e08051. doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08051

Antoneli, V., & Thomaz, E. L. (2012). Produção de serrapilheira em um fragmento de floresta ombrófila mista com sistema de faxinal. Sociedade & natureza, 24(3), 489–503. doi:10.1590/s1982-45132012000300009

BATISTA, F. R. Decomposição de Serapilheira em área do cerrado sentido restrito e plantio de eucalipto no Distrito Federal. Brasilia: Universidade de Brasília, 2017.

Barbosa, R. P., Cairo, P. A. R., Lacerda, J. de J., & Botelho, V. V. (2019). The effects of magnesium deficiency on sugar partitioning do not restrict the root growth in eucalyptus young plants. Ciencia Florestal, 29(2), 622–631. doi:10.5902/1980509826204

Baietto, A., Hirigoyen, A., Hernández, J., & del Pino, A. (2021). Comparative Dynamics of Nutrient Release through Litter Decomposition in Eucalyptus grandis Hill ex Maiden and Pinus taeda L. Stands. Forests, 12(9), 1227. doi:10.3390/f12091227

Bauer, D., Führ, C. S., & Schmit, J. L. (2017). DINÂMICA DO ACÚMULO E DECOMPOSIÇÃO DE SERAPILHEIRA EM FLORESTA ESTACIONAL SEMIDECIDUAL SUBTROPICAL. PESQUISAS, BOTÂNICA., 70, 225–235.

Broadbent, A. A. D., Newbold, L. K., Pritchard, W. J., Michas, A., Goodall, T., Cordero, I., … Bardgett, R. D. (2024). Climate change disrupts the seasonal coupling of plant and soil microbial nutrient cycling in an alpine ecosystem. Global Change Biology, 30(3), e17245. doi:10.1111/gcb.17245

Beslity, J., Shaw, S. B., Drake, J. E., Fridley, J., Stella, J. C., Stark, J., & Singh, K. (2022). A low cost, low power sap flux device for distributed and intensive monitoring of tree transpiration. HardwareX, 12(e00351), e00351. doi:10.1016/j.ohx.2022.e00351

Caldeira, A., Krushe, A. V., Mareschal, L., da Silva, P., Nouvellon, Y., Campoe, O., … Laclau, J.-P. (2023). Low nutrient losses by deep leaching after clearcutting and replanting Eucalyptus plantations in Brazil. Forest Ecology and Management, 534(120866), 120866. doi:10.1016/j.foreco.2023.120866

Carvalho, H. C. de S., Ferreira, J. L. S., Calil, F. N., & Silva-Neto, C. D. M. e. (2019). Estoque de nutrientes na serapilheira acumulada em quatro tipos de vegetação no Cerrado em Goiás, Brasil. Revista Ecologia e Nutrição Florestal - ENFLO, 7, 06. doi:10.5902/2316980x37296

Cunha Neto, F. V., Leles, P. S. S., Pereira, M. G., Bellumath, V. G. H., & Alonso, J. M. (2013). Acúmulo e decomposição da serapilheira em quatro formações florestais. Ciencia Florestal, 23(3), 379–387. doi:10.5902/1980509810549

Chrysargyris, A., Höfte, M., Tzortzakis, N., Petropoulos, S. A., & Di Gioia, F. (2022). Editorial: Micronutrients: The borderline between their beneficial role and toxicity in plants. Frontiers in Plant Science, 13, 840624. doi:10.3389/fpls.2022.840624

Costa, V. C., Nascimento Guedes, W., de Santana Santos, A., & Moreira Nascimento, M. (2018). Multivariate optimization for the development of a fast and simple ultrasound-assisted extraction procedure for multielemental determination in tea leaves by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP OES). Food Analytical Methods, 11(7), 2004–2012. doi:10.1007/s12161-018-1171-8

Costa, S. do V., Pesquero, M. A., & Junqueira, M. H. M. (2019). Litterfall deposition and decomposition in an Atlantic forest in southern Goiás. Floresta e Ambiente, 26(2). https://doi.org/10.1590/2179-8087.074417

De Holanda, A. C., Feliciano, A. L. P., Freire, F. J., De Sousa, F. Q., Freire, S. R. de O., & Alves, A. R. (2017). APORTE DE SERAPILHEIRA E NUTRIENTES EM UMA ÁREA DE CAATINGA. Ciencia Florestal, 27(2), 621–633. doi:10.5902/1980509827747

Demessie, A., Singh, B. R., Lal, R., & Strand, L. T. (2011). Leaf litter fall and litter decomposition underEucalyptusand coniferous plantations in Gambo District, southern Ethiopia. Acta Agriculturae Scandinavica. Section B, Soil and Plant Science, 1–10. https://doi.org/10.1080/09064710.2011.645497

Dent, D. H., Bagchi, R., Robinson, D., Majalap-Lee, N., & Burslem, D. F. R. P. (2006). Nutrient fluxes via litterfall and leaf litter decomposition vary across a gradient of soil nutrient supply in a lowland tropical rain forest. Plant and Soil, 288(1–2), 197–215. doi:10.1007/s11104-006-9108-1

Ferreira, G. W. D., Soares, E. M. B., Oliveira, F. C. C., Silva, I. R., Dungait, J. A. J., Souza, I. F., & Vergütz, L. (2016). Nutrient release from decomposing Eucalyptus harvest residues following simulated management practices in multiple sites in Brazil. Forest Ecology and Management, 370, 1–11. doi:10.1016/j.foreco.2016.03.047

Guo, L. B., & Sims, R. E. H. (1999). Litter decomposition and nutrient release via litter decomposition in New Zealand eucalypt short rotation forests. Agriculture, Ecosystems & Environment, 75(1–2), 133–140. doi:10.1016/s0167-8809(99)00069-9

Giweta, M. (2020). Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. Journal of Ecology and Environment, 44(1). doi:10.1186/s41610-020-0151-2

Huang, W., González, G., Barberena-Arias, M. F., & Zou, X. (2022). Predominant climate control on green leaf decomposition across subtropical rain and dry forests following hurricane disturbances. Soil Biology & Biochemistry, 168(108609), 108609. doi:10.1016/j.soilbio.2022.108609

Hawkesford, M., Horst, W., Kichey, T., Lambers, H., Schjoerring, J., Møller, I. S., & White, P. (2012). Functions of Macronutrients. Em Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (p. 135–189). Elsevier.

Hurteau, M. D. (2021). The role of forests in the carbon cycle and in climate change. Em Climate Change (p. 561–579). Elsevier.
Kronzucker, H. J., Coskun, D., Schulze, L. M., Wong, J. R., & Britto, D. T. (2013). Sodium as nutrient and toxicant. Plant and Soil, 369(1–2), 1–23. doi:10.1007/s11104-013-1801-2

Lili, Z., Vivek, Y., Hengchen, Z., Yaya, S., Xiangxiang, H., Xiaoxia, W., … Yongxiang, K. (2024). Climate drivers of litterfall biomass dynamics in three types of forest stands on the Loess Plateau. Ecological Indicators, 163(112088), 112088. doi:10.1016/j.ecolind.2024.112088

Lebenya, R. M., van Huyssteen, C. W., & du Preez, C. C. (2018). Change in soil organic carbon and nitrogen stocks eight years after conversion of sub-humid grassland to Pinus and Eucalyptus forestry. Soil Research, 56(3), 318. doi:10.1071/sr17171

Laclau, J.-P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J. L., Maquère, V., Krusche, A. V., M'Bou, A. T., … Deleporte, P. (2010). Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Forest Ecology and Management, 259(9), 1771–1785. doi:10.1016/j.foreco.2009.06.010

Liu, Y., Wang, K., Dong, L., Li, J., Wang, X., Shangguan, Z., … Deng, L. (2023). Dynamics of litter decomposition rate and soil organic carbon sequestration following vegetation succession on the Loess Plateau, China. Catena, 229(107225), 107225. doi:10.1016/j.catena.2023.107225

Liu, X., Chen, S., Li, X., Yang, Z., Xiong, D., Xu, C., … Yang, Y. (2022). Soil warming delays leaf litter decomposition but exerts no effect on litter nutrient release in a subtropical natural forest over 450 days. Geoderma, 427(116139), 116139. doi:10.1016/j.geoderma.2022.116139

Liu, X., Feng, Y., Zhao, X., Cui, Z., Liu, P., Chen, X., … Liu, J. (2024). Climatic drivers of litterfall production and its components in two subtropical forests in South China: A 14-year observation. Agricultural and Forest Meteorology, 344(109798), 109798. doi:10.1016/j.agrformet.2023.109798

Luo, Y., Zhao, X., Li, Y., Liu, X., Wang, L., Wang, X., & Du, Z. (2021). Wind disturbance on litter production affects soil carbon accumulation in degraded sandy grasslands in semi-arid sandy grassland. Ecological Engineering, 171(106373), 106373. doi:10.1016/j.ecoleng.2021.106373

Khan, F., Siddique, A. B., Shabala, S., Zhou, M., & Zhao, C. (2023). Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. Plants, 12(15), 2861. doi:10.3390/plants12152861

Kong, J., Lin, Y., Huang, F., Liu, W., He, Q., Su, Y., … Qiu, Q. (2022). Effects of fertilization and dry-season irrigation on litterfall dynamics and decomposition processes in subtropical Eucalyptus plantations. Frontiers in ecology and evolution, 10. doi:10.3389/fevo.2022.919571

Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., … Ahmad, P. (2014). The use of chlorophyll fluorescence kinetics analysis to study the performance of photosynthetic machinery in plants. Em Emerging Technologies and Management of Crop Stress Tolerance (p. 347–384). Elsevier.

Maathuis, F. J. M. (2014). Sodium in plants: perception, signalling, and regulation of sodium fluxes. Journal of Experimental Botany, 65(3), 849–858. doi:10.1093/jxb/ert326

Moura, R. R., Caldeira, M. V. W., Siqueira, D. P., Momolli, D. R., Barroso, D. G., Gomes, R., & Oliveira, F. S. de. (2022). Decomposition and nutrient release of eucalyptus harvest residues in southeast Brazil. CERNE, 28. doi:10.1590/01047760202228013031

Momolli, D. R., Schumacher, M. V., Ludvichak, A. A., Dos Santos, K. F., De Souza, H. P., & Guimarães, C. D. C. (2019). Nutrient cycling in Eucalyptus dunnii: Micronutrients in the litterfall. Floresta, 49(4), 641. doi:10.5380/rf.v49i4.56727

Montañez-S, A., Avella-M, A., & López Camacho, R. (2023). Litterfall and nutrient transfer dynamics in a successional gradient of tropical dry forest in Colombia. Revista de biologia tropical, 71(1), e52278. doi:10.15517/rev.biol.trop..v71i1.52278

Negi, N. P., Prakash, G., Narwal, P., Panwar, R., Kumar, D., Chaudhry, B., & Rustagi, A. (2023). The calcium connection: exploring the intricacies of calcium signaling in plant-microbe interactions. Frontiers in Plant Science, 14, 1248648. doi:10.3389/fpls.2023.1248648

Oliveira, A. M. de, Barreto-Garcia, P. A. B., Novaes, A. B. de, Carvalho, F. F. de, & Meireles, I. E. da S. (2020). Decomposição da serapilheira foliar em plantios de bambu, nim indiano e eucalipto. Ciencia Florestal, 30(3), 845–855. doi:10.5902/1980509838190

Oliveira, A. G; Zanchi, F. B & Vieira, C. H. N. (2023). Incidência e padrões pluviométricos no sul do nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Geografia Física, 16(6), 3548–3559. doi:10.26848/rbgf.v16.6.p3548-3559

Oliveira, A. G. de, Coelho, J. R. de M., & Zanchi, F. B. (2024). Thirty-one years of land use, coverage, and occupation in the municipality of Santa Cruz Cabrália, Bahia. Revista de Geografia, 41(5), 19–29. doi:10.51359/2238-6211.2024.262433

Piovesan, G., Schumacher, M. V., Viera, M., Lopes, V. G., & Welter, C. (2012). Deposição de serapilheira em povoamento de Pinus. Pesquisa agropecuaria tropical, 42(2), 206–211. https://doi.org/10.1590/s1983-40632012000200012

Pérez, P., Barro, R., Pérez, J., Fernández, M. J., Moyano, A., & Ciria, P. (2021). Nutrient release through litterfall in short rotation poplar crops in Mediterranean marginal land. Forests, 12(9), 1185. doi:10.3390/f12091185

Pinto, H. C. A., Barreto, P. A. B., Rodrigues, E. F. da G., De Oliveira, F. G. R. B., De Paula, A., & Amaral, A. R. (2016). DECOMPOSIÇÃO DA SERAPILHEIRA FOLIAR DE FLORESTA NATIVA E PLANTIOS DE Pterogyne nitens E Eucalyptus urophylla NO SUDOESTE DA BAHIA. Ciencia Florestal, 26(4), 1141–1153. https://doi.org/10.5902/1980509825105

Rocha, S. M. G., Vidaurre, G. B., Pezzopane, J. E. M., Almeida, M. N. F., Carneiro, R. L., Campoe, O. C., … Figura, M. A. (2020). Influence of climatic variations on production, biomass and density of wood in eucalyptus clones of different species. Forest Ecology and Management, 473(118290), 118290. doi:10.1016/j.foreco.2020.118290

Rout, G. R., & Sahoo, S. (2015). Role of iron in plant growth and metabolism. Reviews in Agricultural Science, 3(0), 1–24. doi:10.7831/ras.3.1

Santos, F. M., Chaer, G. M., Diniz, A. R., & Balieiro, F. de C. (2017). Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of Eucalyptus and Acacia on a sandy tropical soil. Forest Ecology and Management, 384, 110–121. doi:10.1016/j.foreco.2016.10.041

Sayer, E. J., Leitman, S. F., Wright, S. J., Rodtassana, C., Vincent, A. G., Bréchet, L. M., … Tanner, E. V. J. (2024). Tropical forest above‐ground productivity is maintained by nutrients cycled in litter. The Journal of Ecology, 112(4), 690–700. doi:10.1111/1365-2745.14251

Schumacher, M. V., Corrêa, R. S., Viera, M., & Araújo, E. F. de. (2013). Produção e decomposição de serapilheira em um povoamento de Eucalyptus urophylla x Eucalyptus globulus maidenii. CERNE, 19(3), 501–508. doi:10.1590/s0104-77602013000300018

Sardans, J., & Peñuelas, J. (2021). Potassium control of plant functions: Ecological and agricultural implications. Plants, 10(2), 419. doi:10.3390/plants10020419

Sloboda, B., Marques, R., Bianchin, J., Blum, H., Donha, C., Silveira, F., & Capretz, R. (2017). Litterfall and nutrient dynamics in a mature Atlantic Rainforest in Brazil. Floresta e Ambiente, 24(0). doi:10.1590/2179-8087.033916

Thor, K. (2019). Calcium-nutrient and messenger. Frontiers in Plant Science, 10, 440. doi:10.3389/fpls.2019.00440

Tong, T., Li, Q., Jiang, W., Chen, G., Xue, D., Deng, F., … Chen, Z.-H. (2021). Molecular evolution of calcium signaling and transport in plant adaptation to abiotic stress. International Journal of Molecular Sciences, 22(22), 12308. doi:10.3390/ijms222212308

Tavakol, E., Jákli, B., Cakmak, I., Dittert, K., & Senbayram, M. (2021). Optimization of potassium supply under osmotic stress mitigates oxidative damage in barley. Plants, 11(1), 55. doi:10.3390/plants11010055

Valadão, M. B. X., Carneiro, K. M. S., Inkotte, J., Ribeiro, F. P., Miguel, E. P., & Gatto, A. (2019). Litterfall, litter layer and leaf decomposition in Eucalyptus stands on Cerrado soils. Scientia forestalis, 47(122). doi:10.18671/scifor.v47n122.08

Viera, M., Schumacher, M. V., Araújo, E. F., Corrêa, R. S., & Caldeira, M. V. W. (2014). Deposição de serapilheira e nutrientes em plantio de Eucalyptus urophylla × E. globulus. Floresta e Ambiente, 21(3), 327–338. doi:10.1590/2179-8087.053913

Wu, P.-P., Jiang, L.-X., Zhang, Y., Tu, Q.-H., & Mao, R. (2022). Manganese addition accelerates litter decomposition and alters litter mixing effects in the late stage in subtropical plantations of southern China. Plant and Soil, 481(1–2), 501–510. doi:10.1007/s11104-022-05652-6

Wakeel, A., Farooq, M., Qadir, M., & Schubert, S. (2011). Potassium substitution by sodium in plants. Critical Reviews in Plant Sciences, 30(4), 401–413. doi:10.1080/07352689.2011.587728

Yu, X., Keitel, C., & Dijkstra, F. A. (2023). Ameliorating soil acidity with calcium carbonate and calcium hydroxide: effects on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 23(4), 5270–5278. doi:10.1007/s42729-023-01400-6

Zhang, X., Hedĕnec, P., Yue, K., Ni, X., Wei, X., Chen, Z., … Wu, F. (2024). Global forest gaps reduce litterfall but increase litter carbon and phosphorus release. Communications Earth & Environment, 5(1). doi:10.1038/s43247-024-01453-0

Zayed, O., Hewedy, O. A., Abdelmoteleb, A., Ali, M., Youssef, M. S., Roumia, A. F., … Yuan, Z.-C. (2023). Nitrogen journey in plants: From uptake to metabolism, stress response, and microbe interaction. Biomolecules, 13(10), 1443. doi:10.3390/biom13101443

Zanchi, F. B., Waterloo, M. J., Dolman, A. J., Groenendijk, M., Kesselmeier, J., Kruijt, B., Bolson, M. A., Luizão, F. J., & Manzi, A. O. (2011). Influence of drainage status on soil and water chemistry, litter decomposition and soil respiration in central Amazonian forests on sandy soils. Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, 6(1), 6–29. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.170

5 CONCLUSÃO GERAL

Os resultados deste estudo indicam um maior potencial do VCC 865 para produção de biomassa e incorporação de nutrientes, dessa forma, o torna uma opção favorável para a fertilidade do solo. Enquanto, a menor produção de serapilheira no CO 1407 pode restringir a disponibilidade de nutrientes essenciais como N, P, Ca e Mg, comprometendo potencialmente o desempenho produtivo da cultura ao longo do seu ciclo de crescimento.

Este estudo demonstrou que os clones CO 1407 e VCC 865 adotam estratégias distintas em resposta às variáveis climáticas, com mecanismos de adaptação diferenciados. O clone CO 1407 apresentou maior sensibilidade a ventos fortes e baixa precipitação, enquanto o aumento da temperatura parece atenuar a senescência foliar. Porém, o clone VCC 865 apresentou menor suscetibilidade às variações climáticas imediatas. Nenhum dos clones apresentou correlação significativa com a radiação solar, sugerindo que esta variável não influencia diretamente a produção de serapilheira.

As taxas de decomposição foram elevadas em ambos os clones, superando as relatadas em estudos anteriores com o gênero. O clone VCC 865 destacou-se pela maior eficiência na decomposição da serapilheira, enquanto o clone CO 1407 demonstrou maior eficiência na liberação de nutrientes, com exceção do fósforo, que se acumulou. O sódio foi o elemento com a maior taxa de liberação no clone CO 1407 e, apesar de seu acúmulo no clone VCC 865, esses resultados representam uma descoberta inédita para o gênero *Eucalyptus*. Esses resultados fornecem importantes subsídios para estratégias de manejo e conservação diante das mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

BRAMLEY, H. et al. Transpirational leaf cooling effect did not contribute equally to biomass retention in wheat genotypes under high temperature. Plants, v. 11, n. 16, p. 2174, 2022.

CHEN, Z. et al. The roles of stomatal morphologies in transpiration and nutrient transportation between grasses and forbs in a temperate steppe. Annals of botany, v. 132, n. 2, p. 229–239, 2023.

CASSIANO, C. C.; MOREIRA, R. M. E.; FERRAZ, S. F. DE B. Fast-growing forest management to regulate the balance between wood production and water supply. Scientia agricola, v. 80, 2023.

DAWSON, T. E.; GOLDSMITH, G. R. The value of wet leaves. The new phytologist, v. 219, n. 4, p. 1156–1169, 2018.

FOSTER, N. W.; BHATTI, J. S. Forest Ecosystems: Nutrient Cycling. Em: Encyclopedia of Soil Science - Two-Volume Set. Boca Raton, Flórida, EUA: CRC Press, 2005. p. 718–721.

FLORÊNCIO, G. W. L.; MARTINS, F. B.; FAGUNDES, F. F. A. Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. Industrial crops and products, v. 188, n. 115538, p. 115538, 2022.

GABIRA, M. M. et al. The impact of planting density on forest monospecific plantations: An overview. Forest ecology and management, v. 534, n. 120882, p. 120882, 2023.

GIWETA, M. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. Journal of ecology and environment, v. 44, n. 1, 2020.

KABIR, M. G. et al. A bio-sustainable approach for reducing Eucalyptus tree-caused agricultural ecosystem hazards employing Trichoderma bio-sustained spores and mycorrhizal networks. Frontiers in microbiology, v. 13, 2023.

LIN, H. et al. Stronger cooling effects of transpiration and leaf physical traits of plants from a hot dry habitat than from a hot wet habitat. Functional ecology, v. 31, n. 12, p. 2202–2211, 2017.

NEPAL, P. et al. Projecting global planted forest area developments and the associated impacts on global forest product markets. Journal of environmental management, v. 240, p. 421–430, 2019.

NADEZHDINA, N. et al. Root sap flow as a tool to establish hydrological thresholds for plant growth and survival. Agricultural water management, v. 241, n. 106388, p. 106388, 2020.

SHEIL, D. Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle. Forest ecosystems, v. 5, n. 1, 2018.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Material suplementar da validação do método de determinação de metais pesados em tecido vegetal.

S1 -Performance analítica

Analito	Linearidade	R^2	Regressão	Precisão (RSD%)	LD	LQ	Exatidão
	Faixa linear (mgL^{-1})		y = ax + b (n=3)	Repetibilidade (n = 4)	(mgL^{-1})	(mgL^{-1})	(Recuperação %)
Na	0,03 - 1,00	0,9957	y = 414467x + 29430	0,90 -10,3	0,1314	0,3982	100
K	0,03 - 1,01	0,9964	y = 74637x + 3152,5	0,17 -1,1	0,0085	0,0257	70
Ca	0,03 - 1,02	0,9987	y = 286684x - 1156,2	0,58 - 4,8	0,0051	0,0154	84
Mg	0,03 - 1,03	0,9984	y = 203374x + 1624,9	0,26 - 1,6	0,0169	0,0513	86
Fe	0,03 - 1,04	0,9993	y = 10771x + 208,68	0,18 - 1,4	0,0067	0,0204	95
Mn	0,05 - 2,5	0,9991	y = 49828x - 683,46	0,34 - 0,90	0,0002	0,0005	90
P	0,1 -40	0,9974	y = 529,94x - 153,95	0,1 - 0,70	0,185239	0,561332	80

S2 - Parâmetros instrumentais e do método no MP-OES Agilent 4210

Parâmetro	**Especificação**						
Analitos	Ca	Na	Mg	Fe	K	P	Mn
Comprimento de onda (nm)	393,366	588,995	279,553	371,993	766,491	764,934	403,076
Posição de observação do plasma	-10	0	-10	10	-20	-30	0

Taxa de fluxo do gás de nebulização ($Lmin^{-1}$)	0.7	1	0.55	0.7	1	0.5	1
Nebulizador	OneNeb Series 2						
Velocidade da bomba (rpm)	15						
Tubulação da bomba da amostra	Orange/Green Solvaflex						
Tubulação da bomba de descarte	Blue/blue Solvaflex						
Tempo de leitura (s)	3						
Nº de réplicas	3						
Retardo na captação da amostra (s)	15						
Tempo de lavagem (s)	15						
Tempo de estabilização (s)	15						
Tempo de captação (s)	15						
Correção de background	Auto						
Câmara de nebulização	Passagem dupla de vidro ciclônica						
Tocha de plasma	Tocha Easyfit						
Fonte de gás	Nitrogênio						