



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: FITOTECNIA

VARIAÇÃO DOS TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E
NUTRIENTES EM 30 ANOS DE CULTIVOS DE EUCALIPTO AO
LONGO DE UM GRADIENTE DE PRECIPITAÇÃO

MARIANA DOS SANTOS NASCIMENTO

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
2025

MARIANA DOS SANTOS NASCIMENTO

**VARIAÇÃO DOS TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO E
NUTRIENTES EM 30 ANOS DE CULTIVOS DE EUCALIPTO AO
LONGO DE UM GRADIENTE DE PRECIPITAÇÃO**

Tese de Doutorado apresentada
à Universidade Estadual do
Sudoeste da Bahia, como parte
das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Agronomia,
Área de Concentração em
Fitotecnia, para a obtenção do
Título de Doutora.

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Marques Monroe

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA - BRASIL
2025

N196v

Nascimento, Mariana dos Santos.

Varição dos teores de matéria orgânica do solo e nutrientes em 30 anos de cultivos de eucalipto ao longo de um gradiente de precipitação / Mariana dos Santos Nascimento, 2025.

51f. ; il. color.

Orientador (a): Dr.^a Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2025.

Inclui referências. F 43 - 51

1. *Eucalyptus spp.*. 2. Solos – Matéria orgânica. 3. Solos - Fertilidade. 4. Solos - Manejo. I. Barreto-Garcia, Patrícia Anjos Bittencourt. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. T.

Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134

UESB - Campus Vitória da Conquista – BA



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
Área de Concentração em Fitotecnia
Campus de Vitória da Conquista, BA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: “VARIÇÃO DOS TEORES DE MATÉRIA ORGÂNICA E NUTRIENTES DO SOLO EM 30 ANOS DE CULTIVO DE EUCALIPTO SOB ZONAS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIAL”

AUTOR (A): Mariana dos Santos Nascimento

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTORA EM AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



PATRICIA ANJOS BITTENCOURT BARRETO GARI
Data: 27/08/2025 22:59:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, D.Sc. (UESB)

Documento assinado digitalmente



PAULO HENRIQUE MARQUES MONROE
Data: 28/08/2025 09:51:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Paulo Henrique Marques Monroe, D.Sc. (Pós-DocUESB)

Documento assinado digitalmente



ODAIR LACERDA LEMOS
Data: 02/09/2025 16:11:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Odair Lacerda Lemos, D.Sc. (UESB)

Documento assinado digitalmente



ROBSON BORGES DE LIMA
Data: 02/09/2025 18:01:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Robson Borges de Lima, D.Sc., (UEAPSB)

Documento assinado digitalmente



JOAO CARLOS MEDEIROS
Data: 28/08/2025 09:30:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

João Carlos Medeiros, D.Sc. (UFSB)

Documento assinado digitalmente



EDILENE PEREIRA FERREIRA
Data: 02/09/2025 15:12:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Edilene Pereira Ferreira, D.Sc. (UESB)

Data de realização: 25 de agosto de 2025.

Aos meus pais, Miguel Raimundo do Nascimento e Ilma Soeme dos Santos Nascimento.

A minha irmã Muriel e a minha sobrinha Nathalia.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me sustentar e não desviar seus olhos de mim, por me amparar mesmo quando eu achava que nada ia dar certo e me dar forças para chegar até aqui.

Aos meus pais, Ilma e Miguel, pelo amor incondicional, pela confiança depositada e por estarem comigo em todos os momentos, incentivando-me a prosseguir mesmo diante das dificuldades. À minha irmã, Muriel, pelo apoio constante, por acreditar no meu potencial e por me impulsionar a buscar sempre a minha melhor versão. À minha sobrinha, Nathalia, por ser fonte de inspiração e motivação para que eu me dedique a ser sempre um exemplo positivo, e ao Danilo, meu companheiro, pela compreensão e presença nos momentos de maior pressão e desgaste, sendo meu porto seguro ao longo deste percurso.

À minha orientadora, Patrícia A. B. Barreto-Garcia, pela orientação técnica e acadêmica, pela paciência diante das diversas mudanças ocorridas no desenvolvimento deste trabalho e pela habilidade em indicar caminhos viáveis para superar os obstáculos encontrados.

Ao meu coorientador, Paulo Monroe, pela confiança inabalável na relevância e no potencial deste estudo, pelo incentivo permanente para que eu ampliasse meus horizontes acadêmicos e pela postura sempre construtiva e motivadora. Seu comprometimento e dedicação foram fundamentais para que este trabalho fosse concluído.

Ao David Evandro e à Carla Garcia, pela oportunidade e confiança em trabalhar com o time de Pesquisa e Desenvolvimento em Manejo, reforçando a convicção de que uma pesquisa de base sólida é o alicerce para avanços consistentes nas práticas de manejo florestal. Um agradecimento também ao time de manejo, pelo incentivo constante para que eu acreditasse mais em mim mesma e na minha capacidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos durante um período do curso.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, pela oportunidade de formação e pelo suporte institucional, essenciais para a concretização deste projeto.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram dentro destes quatro anos para a realização deste trabalho, seja com apoio técnico, palavras de incentivo ou gestos de motivação, registro minha profunda gratidão.

RESUMO

MARIANA, M.S. **Variação dos teores de matéria orgânica e nutrientes em 30 anos de cultivos de eucalipto ao longo de um gradiente de precipitação, Brasil.** Vitória da Conquista - BA, UESB, 2025. 52p. (Tese: Doutorado em Agronomia; Área de Concentração: Fitotecnia) *.

Este estudo avaliou a variação dos teores de matéria orgânica do solo (MOS) e nutrientes ao longo de 30 anos de cultivos de *Eucalyptus spp.* sob diferentes regimes pluviométricos no extremo sul da Bahia. Foram analisados dados de até cinco ciclos sucessivos de cultivo, abrangendo quatro classes de precipitação (≤ 1.050 mm; 1.050–1.150 mm; 1.150–1.250 mm; ≥ 1.250 mm). Amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0–20 e 20–40 cm e analisadas quanto a pH, capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB), macro e micronutrientes, fósforo e matéria orgânica. Os resultados indicaram aumento consistente da CTC e SB ao longo dos ciclos, especialmente em solos distróficos, associado à manutenção dos resíduos florestais (folhas, cascas e galhos) no campo e adubações regulares. A ciclagem de nutrientes, promovida pela decomposição da serapilheira, favoreceu a reposição de cálcio, magnésio e fósforo, bem como a melhoria das propriedades químicas do solo. Em contrapartida, observou-se redução nos teores de potássio e matéria orgânica em alguns locais, especialmente nos primeiros ciclos, efeito atribuído à alta mobilidade do K e à mineralização acelerada da MO preexistente, causada pela modificação do ambiente de pastagem para plantio de eucalipto. A precipitação desempenhou papel decisivo na fertilidade de plantios de eucalipto. Nutrientes de maior mobilidade, como K^+ e Ca^{2+} , são diretamente afetados pelo aumento da pluviosidade, enquanto elementos menos móveis, como o fósforo, não apresentam padrão de resposta claro. Em regiões de baixa precipitação, a menor lixiviação contribui para a estabilidade da soma de bases (SB). Em áreas intermediárias, porém, o incremento das chuvas intensifica a lixiviação, e, sem reposição adequada, observa-se queda acentuada da fertilidade. Já em ambientes úmidos, a maior taxa de decomposição e ciclagem de nutrientes, associada à elevada produtividade, favorece a recuperação relativa da SB ao longo dos ciclos. Nos Latossolos distróficos, a argila e a intensa atividade biológica aceleram a decomposição da matéria orgânica, mas promovem a formação de complexos organominerais que elevam a CTC e a retenção de bases. Nos Argissolos eutróficos, a alta saturação por bases e o cultivo mínimo garantem estabilidade, ao passo que Neossolos Flúvicos e Espodossolos hidromórficos apresentam maior variabilidade e risco de lixiviação.

Palavras-chave: *Eucalyptus spp.*, matéria orgânica do solo, capacidade de troca de cátions, manejo conservacionista, fertilidade do solo.

***Orientadora:** Profa. Dra. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, UESB;

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Marques Monroe, UESB.

ABSTRACT

MARIANA, M.S. **Variation in Soil Organic matter and nutrient levels over 30 years of eucalyptus cultivation under rainfall zones, Brazil.** Vitória da Conquista - BA, UESB, 2025. 52p. (Thesis: Doctorate science in Agronomy; Area of Concentration: Crop Science)*

This study evaluated the variation in soil organic matter (SOM) and nutrient contents over 30 years of *Eucalyptus spp.* cultivation under different rainfall regimes in the extreme south of Bahia, Brazil. Data from up to five successive cultivation cycles were analyzed, encompassing four precipitation classes (≤ 1050 mm; 1050–1150 mm; 1150–1250 mm; ≥ 1250 mm). Soil samples were collected at depths of 0–20 cm and 20–40 cm and analyzed for pH, cation exchange capacity (CEC), base saturation (SB), macro- and micronutrients, phosphorus, and organic matter. The results indicated a consistent increase in CEC and SB across cycles, particularly in dystrophic soils, associated with the maintenance of forest residues (leaves, bark, and branches) in the field and regular fertilization. Nutrient cycling, promoted by litter decomposition, favored the replenishment of calcium, magnesium, and phosphorus, as well as the improvement of soil chemical properties. In contrast, reductions in potassium and organic matter contents were observed in some areas, especially during the first cycles, an effect attributed to the high mobility of K and the accelerated mineralization of pre-existing SOM following the conversion of pastureland to eucalyptus plantations. Rainfall played a decisive role in eucalyptus plantation fertility. Highly mobile nutrients, such as K^+ and Ca^{2+} , were directly affected by increased precipitation, while less mobile elements, such as phosphorus, did not exhibit a consistent response pattern. In regions of low rainfall, reduced leaching contributed to the stability of SB. In intermediate rainfall zones, however, greater leaching was observed, and without sufficient replenishment, fertility declined markedly. In wetter environments, higher rates of decomposition and nutrient cycling, associated with increased productivity, allowed for relative recovery of SB over successive cycles. In dystrophic Oxisols, active clays and high biological activity accelerated SOM decomposition but simultaneously favored the formation of organo-mineral complexes that enhanced CEC and base retention. In eutrophic Ultisols, high base saturation combined with minimum tillage practices ensured long-term stability, whereas Fluvisols and hydromorphic Spodosols, with limited physical and chemical protection of SOM, showed greater variability in response and higher risk of nutrient leaching.

Keywords: *Eucalyptus spp.*; soil organic matter; cation exchange capacity; conservation-oriented management; soil fertility; rainfall regime; nutrient cycling.

Advisor: Profa. Dra. Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia, UESB; **Co-advisor:** Prof. Dr. Paulo Henrique Marques Monroe, UESB.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição das estações meteorológicas na área.	20
Figura 2 – Distribuição de zonas de precipitação que deram origem aos sítios.	21
Figura 3 – Indicadores de fertilidade em relação aos ciclos de plantio em duas profundidades do solo. P: fósforo; MO: matéria orgânica; MG: magnésio; K: potássio; CTC: capacidade de troca de cátions; Ca: cálcio e SB: soma de bases; n: número de amostragens. Letras maiúsculas comparam as profundidades e minúsculas, os ciclos pelo teste de Fisher (LSD, 5%).	26
Figura 4 – Variação dos teores dos elementos do solo em relação à precipitação e aos ciclos de cultivo. P: fósforo; MO: matéria orgânica; MG: magnésio; K: potássio; CTC: capacidade de troca de cátions; Ca: cálcio e SB: soma de bases; n: número de amostragens. Letras maiúsculas comparam a diferenças entre os ciclos e minúsculas, entre as faixas de precipitação pelo teste de Fisher (LSD, 5%).	32
Figura 5 – Variação da soma de bases (SB) entre o primeiro ciclo e o mais atual em diferentes tipos de solo (0–20 cm de profundidade).	36
Figura 6 – Variação da matéria orgânica (MO) entre o primeiro ciclo e o mais atual em diferentes tipos de solo (0–20 cm de profundidade).	37
Figura 7 – Variação da capacidade de troca catiônica (CTC) total entre o primeiro ciclo e o mais atual em diferentes tipos de solo (0–20 cm de profundidade).	39
Figura 8 – Variação da matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC) e soma de bases entre o primeiro ciclo e o mais atual (0–20 cm de profundidade).	40
Figura 9 – O gráfico mostra uma análise de regressão entre a CTC e os resultados de matéria orgânica do solo.	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Definição do número de amostras de acordo com o tamanho da área.....21

Tabela 2 – Dados requeridos pelo sistema NUTRICALC para estimar o balanço nutricional e recomendar fertilizações em cultivo.....23

Tabela 3 – Variação da média geral dos atributos químicos do solo na camada de 0–20 cm entre o primeiro e o ciclo mais recente de cultivo de eucalipto. Ca: cálcio ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$); Mg: magnésio ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$); P: fósforo (cmol/dm^3); K: potássio ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$); SB: soma de bases ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$); Matéria orgânica: teor de matéria orgânica do solo (%) CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0 ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$), pH: potencial hidrogeniônico (unidade de pH em H_2O).29

LISTA DE SÍMBOLOS

a ^c	Carga elétrica (vem de “equivalente em carga” ou “átomos de carga”)
H+Al	Acidez potencial
P-rem	Fósforo remanescente
S	Enxofre
C	Centi: prefixo do Sistema Internacional = 1/100.
Cm	Centímetros
B	Boro
Cu	Cobre
dm ³	Decímetro cúbico, equivalente a 1 litro de solo.
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
Mm	Milímetros
Mn	Manganês
Mol	Unidade de quantidade de matéria.
N	Nitrogênio
CCM	Cinza-cálcio-magnésio (formulação)
EMAs	Estações Meteorológicas Automáticas
SB	Soma de bases
MO	Matéria orgânica do solo
CTC	Capacidade de troca catiônica
t	CTC efetiva
T	CTC a pH 7
V	Saturação por bases
m	Saturação por alumínio
pH	Potencial hidrogeniônico
P	Fósforo
K	Potássio
Ca	Cálcio
Mg	Magnésio
Al	Alumínio
SO ₄	Sulfato
Zn	Zinco

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 Cultura do eucalipto	14
2.2 Funções da matéria orgânica do solo (MOS).....	14
2.3 Efeito da matéria orgânica na produção de eucalipto	16
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Área de estudo	19
3.1.1 Caracterização climática e de sítios	19
3.2 Coleta e análise do solo.....	21
3.2.1 Metodologia de coleta.....	21
3.3.2 Manejo de adubação adotado.....	22
3.3 Análise estatística.....	24
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Variação dos elementos do solo ao longo dos ciclos em diferentes profundidades do solo.....	25
4.2 Variação dos elementos do solo ao longo dos ciclos em diferentes faixas de pluviosidade.....	30
4.3 Variação espacial dos atributos do solo	35
5 CONCLUSÃO	42
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

xi

O gênero *Eucalyptus*, pertencente à família Myrtaceae, compreende aproximadamente 730 espécies, variedades e híbridos, que apresentam variações significativas em características físico-mecânicas e estéticas, como cor, teor de extrativos, densidade e porosidade (Lima et al., 2023). O cultivo de eucalipto totaliza 7,6 milhões de hectares, a maior superfície de área plantada no segmento florestal brasileiro, responsáveis por mais de 90% da madeira utilizada para fins produtivos (IBÁ, 2023). A produtividade média de eucalipto no Brasil é de 32,7 m³ por hectare-ano (IBÁ, 2023) e, embora as florestas plantadas representem menos de 1% do território nacional, esse setor contribui com 1,3% do PIB bruto nacional e 6,9% do PIB industrial. O Brasil é o maior produtor mundial de celulose (IBÁ, 2023). A Bahia destaca-se como o quarto estado em área plantada, com 650.332 hectares (Duarte, 2023; IBÁ, 2023).

O aumento da produtividade dos plantios de eucalipto tem impulsionado a comunidade científica a reavaliar aspectos ambientais relacionados à sua expansão, com foco na sustentabilidade das florestas cultivadas. Nesse sentido, o cultivo de eucalipto é majoritariamente conduzido sob sistemas de cultivo mínimo ou plantio direto, os quais preservam a estrutura do solo por meio da redução do revolvimento e da manutenção da cobertura vegetal. Este manejo é alternativa para práticas convencionais como aração e gradagem, que aceleram a degradação física e química do solo e intensificam processos erosivos após eventos pluviométricos intensos (Salomão et al., 2020; Ramella et al., 2020; Gobbi et al., 2022).

Ainda, o cultivo do eucalipto é caracterizado por ciclos produtivos de 6 a 7 anos, e a repetição sucessiva desses ciclos ao longo do tempo promove alterações significativas nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, com destaque para a dinâmica da matéria orgânica (MO) e para a disponibilidade de nutrientes essenciais, como cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), potássio (K⁺) e fósforo (P) (Rodrigues et al., 2019). A matéria orgânica do solo desempenha papel central na manutenção da fertilidade, porque atua na retenção de água e nutrientes, na estabilização da estrutura do solo e na promoção da atividade microbiana (Cook et al., 2016; Xu et al., 2020).

Ao longo de sucessivas rotações de eucalipto, o aporte de resíduos orgânicos pode contribuir para o aumento dos estoques de carbono orgânico e ciclagem de nutrientes. A repetição dos plantios resulta na deposição contínua de serapilheira, raízes senescentes e

resíduos da colheita, como cascas e galhos (Xu et al., 2020; Cook et al., 2016). A importância da ciclagem de nutrientes e adição de matéria orgânica durante as rotações do eucalipto se intensifica em regiões com precipitação elevada, que pode potencializar a lixiviação de bases e a acidificação do solo (Tan et al., 2024). Se, por um lado, em zonas com precipitação inferior a 1.050 mm, observa-se, em geral, maior acúmulo de bases trocáveis, em virtude da menor mobilidade dos nutrientes no perfil do solo, por outro, em áreas com precipitação superior a 1.250 mm, a elevação do teor de matéria orgânica pode compensar perdas nutricionais pela lixiviação, evidenciando uma complexa interação entre o regime hídrico e os processos de formação e conservação da fertilidade do solo (Gómez-Rey et al., 2010; Zhou et al., 2020).

Em regiões tropicais predominam solos intemperizados e de baixa fertilidade natural (Laclau et al., 2010). Portanto, a manutenção ou melhoria da qualidade do solo é fundamental para garantir a sustentabilidade dos sistemas florestais nessa região (Binkley e Fisher, 2019). Nesse cenário, torna-se essencial avaliar os impactos do uso e manejo florestal sobre os atributos do solo (Braga et al., 2022), uma vez que o estudo da dinâmica da matéria orgânica e dos nutrientes ao longo dos ciclos de cultivo (seja por reforma ou rebrota) é de grande relevância, considerando que a produtividade e a ciclagem de nutrientes estão diretamente associadas à disponibilidade de matéria orgânica no solo (Cunha et al., 2023).

Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo analisar os efeitos combinados das rotações sucessivas de eucalipto e dos diferentes regimes de precipitação sobre os teores de matéria orgânica e nutrientes do solo ao longo de 30 anos de uso contínuo. A avaliação busca gerar subsídios para a compreensão da sustentabilidade dos sistemas produtivos e da manutenção da fertilidade dos solos florestais. Para isto, assumiram-se as seguintes hipóteses: (1) os ciclos sucessivos de cultivo promovem o acúmulo de matéria orgânica e nutrientes no solo, em função do efeito cumulativo da deposição de serapilheira ao longo do tempo; (2) locais de maior índice pluviométrico apresentam, em geral, maiores teores de matéria orgânica no solo superficial, porém menor fertilidade do solo, devido à intensificação dos processos de lixiviação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura do eucalipto

Pertencente à família Myrtaceae, o gênero *Eucalyptus* de origem australiana inclui cerca de 730 espécies e inúmeras variedades e híbridos. Segundo Gruber (2006), pode haver mais de mil classes taxonômicas divididas em 7 subgêneros, com genótipos adaptados às mais variadas condições de solo e clima. As espécies pertencentes a esse gênero apresentam como características árvores típicas de florestas altas, compostas por plantas sempre-verdes possuindo madeira de pequena a elevada densidade, variando de aproximadamente 0,3 a 1,0 g.cm⁻³ (Ribeiro, 2009).

As espécies mais plantadas atualmente no Brasil são: *Eucalyptus camaldulensis*, *Corymbia citriodora*, *E. grandis*, *E. robusta*, *E. saligna*, *E. globulus*, *E. deglupta*, *E. tereticornis*, *E. pellita*, *E. moorei*, *E. smithii*, *E. urophylla* e *E. resinifera*. Além dessas, são desenvolvidos os híbridos, como é o caso do *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* x *E. urophylla*) (CIB, 2008).

O crescente investimento em implantação da cultura em todas as regiões do Brasil se deve ao rápido crescimento do dossel florestal, à alta produtividade, aos múltiplos produtos de base florestal e seus lucros gerados, o que correspondeu no ano de 2021 a uma receita bruta de R\$ 260 bilhões, representando no PIB nacional um valor de 1,3% da economia brasileira, equivalente ao maior valor já obtido pela cadeia de base florestal na última década (IBÁ, 2023).

A área de árvores plantadas totalizou 9,94 milhões de hectares em 2022, um crescimento de 0,3% em relação ao ano anterior. Especificamente o eucalipto, abrangendo 76% da área plantada no Brasil, permanece como a espécie mais cultivada, totalizando 7,6 milhões de hectares. Os plantios de eucalipto estão localizados, principalmente, nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do país, com destaque para Minas Gerais (29%), Mato Grosso do Sul (15%) e São Paulo (13%). A Bahia é o quarto estado em área plantada, com 0,7 milhões de ha (IBÁ, 2023).

2.2 Funções da matéria orgânica do solo (MOS)

A matéria orgânica é composta majoritariamente por carbono (C), além de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo e enxofre. Inclui resíduos vegetais e animais em diferentes estágios de decomposição, além de biomassa microbiana e compostos

intimamente ligados aos argilominerais do solo (Xavier, 2013). Sua principal fonte são os resíduos vegetais, especialmente folhas, que representam até 70% da serapilheira depositada na superfície do solo (Carvalho et al., 2017).

A decomposição da serapilheira regula o acúmulo de matéria orgânica e a liberação de nutrientes, sendo essencial para o funcionamento dos ecossistemas florestais (Oliveira et al., 2020). Diferentes espécies vegetais contribuem para a qualidade e dinâmica da MOS, influenciando diretamente a mineralização, o suprimento de energia e a ciclagem de carbono e nutrientes (Tavares et al., 2019; Inkotte et al., 2019; Han et al., 2024).

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha papel fundamental na manutenção da fertilidade e na sustentabilidade dos ecossistemas agrícolas e florestais, sobretudo em solos tropicais com baixa capacidade de troca de cátions (CTC) e elevada suscetibilidade à lixiviação. Ela atua como um importante reservatório de cargas negativas, contribuindo para o aumento da CTC e retenção de cátions essenciais como cálcio, magnésio, potássio e amônio (Embrapa, 2022). Além disso, sua decomposição fornece nutrientes de forma gradual, favorecendo a ciclagem interna nos sistemas de produção e o equilíbrio entre perdas e entradas de elementos no solo (Khan et al., 2024).

Nos plantios de *Eucalyptus* spp., essa função é particularmente relevante, considerando a intensa absorção de nutrientes e o sistema radicular agressivo da cultura. Práticas como a manutenção da serapilheira, o aproveitamento de resíduos florestais (folhas, cascas, galhos) e o manejo conservacionista ajudam a preservar ou elevar os teores de MOS, promovendo melhorias na estrutura física do solo, maior retenção de umidade, aumento da atividade biológica e redução das perdas por erosão (Baldotto et al., 2015).

A MOS pode ser dividida em duas frações: a lábil (ou não-húmica), composta por materiais recém-aportados e de rápida decomposição, e a fração húmica, quimicamente alterada e de maior estabilidade. A fração lábil, por sua vez, é mais sensível às práticas de manejo e representa de 3 a 20% do carbono total do solo, podendo atingir até 40% em solos arenosos pouco protegidos (Silva et al., 2011; Guo et al., 2018; Zhang et al., 2018).

Em solos sob vegetação natural, mesmo com variações climáticas sazonais, a constância entre taxas de produção e decomposição de resíduos mantém os estoques de MOS relativamente estáveis (Parron et al., 2015). Já em sistemas agrícolas, a adoção de

técnicas conservacionistas, como o plantio direto, tem se mostrado eficiente na preservação da MOS e na melhoria dos atributos físicos e químicos do solo (Costa et al., 2015; Pimentel et al., 2025). Esses sistemas conservacionistas contribuem para o acúmulo de palhada, formação de agregados estáveis e maior porosidade, além de aumentar a disponibilidade de nutrientes como fósforo, cálcio, magnésio, potássio e o carbono orgânico total.

A adoção de práticas e sistemas de manejo conservacionistas pode tornar a propriedade agrícola sustentável através da preservação dos recursos naturais. Esses sistemas podem viabilizar a produção, com rendimentos produtivos adequados e respeitando a dinâmica do carbono, com vistas a manter o estoque desse elemento no solo e reduzir emissões de CO₂ (Souza e Guimarães, 2013; Costa et al., 2015).

Dentre as técnicas que vêm sendo implantadas tendo em vista a manutenção e a diversificação da serapilheira, citam-se o sistema de plantio direto (SPD), a rotação de culturas e os sistemas agroflorestais (SAFs), como a integração lavoura-pecuária (ILP) (Costa et al., 2015). O sucesso desses sistemas produtivos deve-se ao fato da palhada acumulada pelas plantas de cobertura, pastagens ou restos culturais de lavouras comerciais proporcionar um ambiente favorável à recuperação ou manutenção dos atributos físicos e químicos do solo (Mendonça et al., 2014). Esses sistemas também são chamados sistemas de produção conservacionistas, e a partir do seu uso têm sido observadas melhorias nos atributos do solo, especialmente devido à manutenção ou ao incremento da MOS (Mendonça et al., 2014).

O trabalho de Brown et al. (2018) só confirma os aspectos positivos do manejo conservacionista, uma vez que, ao analisar a influência do plantio direto e convencional no solo, observou que o primeiro promoveu maior qualidade estrutural ao solo, com redução da densidade e aumento da porosidade total. Ainda nesse estudo, obteve-se maior rendimento dos grãos cultivados e também se observou um ganho em nutrientes como fósforo, cálcio, magnésio e potássio, além de carbono orgânico, com a manutenção dos resíduos no sistema.

2.3 Efeito da matéria orgânica na produção de eucalipto

O rápido crescimento e a alta produtividade do eucalipto, aliados à sua versatilidade em diversos setores (como papel, celulose, móveis, painéis de madeira, pisos, carvão e construção civil), explicam sua aceitação e expansão acelerada em todas

as regiões do país. Entretanto, embora o plantio de eucalipto tenha inicialmente sido incentivado pelos benefícios econômicos, ele também oferece diversos aspectos ambientais positivos. Um exemplo é a proteção das matas nativas contra a supressão, já que mais de sete milhões de hectares de áreas reflorestadas com eucalipto são destinados à indústria e à produção de subprodutos que, de outra forma, seriam extraídos das florestas nativas (Ronquim, 2016; Amorim et al., 2021).

O eucalipto também desempenha um papel importante na conservação do solo e da água. Sua copa reduz o impacto direto das gotas de chuva no solo, ajudando a prevenir a erosão e, conseqüentemente, protegendo os recursos hídricos próximos, uma vez que o solo erodido poderia ser transportado pela enxurrada e depositado em rios, córregos e lagos, causando o assoreamento (Cândido et al., 2014). Além disso, o eucalipto contribui para a fixação de CO₂: um hectare pode estocar ~180–190 t CO₂ em um ciclo de 7 anos, conforme medição em campo em MG (187,35 t CO₂/ha) (Souza et al., 2019).

Adicionalmente, de acordo com Carvalho et al. (2017), a serapilheira encontrada nas plantações de eucalipto é de grande importância na ciclagem de nutrientes, uma vez que contribui para estabilização dos processos erosivos, recuperação de vegetação original e manutenção da sustentabilidade dos ecossistemas e de florestas naturais. A quantidade de serapilheira, biomassa e nutrientes encontradas no solo é importante para entender a estrutura do ecossistema e definição da sustentabilidade do ecossistema florestal (Spangenberg et al., 1996). Podem levar de um a três anos para se decompor (Andrade et al., 2003).

O rápido crescimento das plantações de eucalipto resulta em uma elevada mobilização de nutrientes (Gatto et al., 2014), sendo o lenho a parte da planta que mais acumula biomassa aérea, representando de 60 a 80% da biomassa total produzida (Foelkel, 2005; Gatto et al., 2014; Dick et al., 2017; Bentancor et al., 2019; Garlet, 2021). Esse acúmulo define o grau de exportação de nutrientes, com a seguinte ordem média de exportação na parte aérea: N > K > Ca > S > Mg > P (Gatto et al., 2014; Vargas et al., 2019; Araújo et al., 2020), e para os micronutrientes: Fe > Mn > B > Zn > Cu (Dick et al., 2017).

Desse nutriente estocado, Foelkel (2005) afirma que estudos têm revelado que os plantios de eucalipto retornam para o solo e para a floresta entre 60% e 70% do nitrogênio absorvido do solo, entre 35% e 60% do fósforo, entre 55% e 80% do potássio, entre 40%

e 60% do cálcio e 55% e 70% do magnésio através do manejo de cultivo mínimo e manutenção da casca na área. Barros et al. (2024) afirmam que o cultivo de eucalipto, de modo geral, gera efeitos positivos nos atributos químicos do solo, como a formação de serapilheira, a ciclagem de nutrientes e o aumento da matéria orgânica. Viana (2004) também destaca que plantações florestais de rápido crescimento podem contribuir tanto física quanto quimicamente para a recuperação de áreas degradadas ou com uso inadequado do solo, servindo como suporte para práticas de controle da erosão.

De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES (2012), as florestas fixam carbono durante seu crescimento armazenando-o como constituinte de suas partes. As florestas plantadas o fazem mais eficientemente, pois são mantidas em pé no seu período de maior crescimento, quando, além do carbono usado para se alimentarem, elas fixam a substância na forma de madeira. Gatto et al. (2010) ainda referem que as plantações de eucalipto constituem opção efetiva de captura de C e podem imobilizar pelo menos $50 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de CO_2 da atmosfera. No Brasil a produção média de florestas é maior quando comparada com a de outros países, e, como consequência disso, o carbono fixado por essas florestas também é maior, devido a sua produtividade.

Estudo realizado por Vital (2007), com base em um inventário de *E. grandis* de seis anos de idade em Viçosa (MG), mostrou que o carbono é armazenado na parte aérea, nas raízes e na manta orgânica, sendo a parte aérea a principal responsável pela fixação. Lima et al. (2008) destacaram que o cultivo de eucalipto em áreas anteriormente ocupadas por pastagens mal manejadas promoveu a recuperação dos estoques de Carbono Orgânico Total (COT). Além de remover e estocar carbono, o setor florestal também contribui para a redução de emissões ao substituir fontes não renováveis pelo uso de produtos de origem florestal, como na geração de energia limpa (IBÁ, 2023).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo contempla onze municípios no sul e extremo sul da Bahia, quais sejam: Belmonte, Canavieiras, Eunápolis, Guaratinga, Itabela, Itagimirim, Itapebi, Mascote, Porto Seguro, Potiraguá e Santa Cruz de Cabrália (Figura 1). A região está inserida no bioma Mata Atlântica, conhecido pela rica biodiversidade de espécies nativas como Jequitibá-rosa (*Cariniana legalis*), Tauari (*Couratari guianensis*), Guapuruvu (*Schizolobium parahyba*), Jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra*) e múltiplas culturas como cacau, mamão e maracujá (Almeida, 2025; Pedreira 2008). Os plantios são 100% formados por clones de eucalipto obtidos a partir do cruzamento das espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. O relevo predominante na região é descrito como Relevo de Tabuleiro; caracteriza-se por apresentar planícies costeiras formadas por grandes platôs intercalados por vales. As regiões com plantio ocupam áreas herdadas de pastagens (sujas ou limpas).

Os solos predominantes na região são classificados como Argissolo Amarelo distrófico e Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico e Latossolos amarelos distróficos (Santos et al., 2018).

3.1.1 Caracterização climática e de sítios

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região trata-se de um clima Af – quente e úmido ao longo de todo o ano, com uma estação seca pouco marcada. As temperaturas médias variam entre 25 °C e 27 °C, com baixa amplitude térmica. A radiação solar média diária é de 18,5 MJ m⁻² e a precipitação anual atinge cerca de 1.256 mm, com chuvas mais intensas entre novembro e abril (Gentil, 2010).

Os dados das caracterizações climáticas foram obtidos de 12 Estações Meteorológicas Automáticas (EMAs), estrategicamente distribuídas entre as regiões administrativas: Central A, Central B, Norte, Oeste A, Oeste B e Sul (Figura 1). Esses dados permitem o zoneamento climático das áreas de plantio, garantindo decisões de manejo mais precisas.

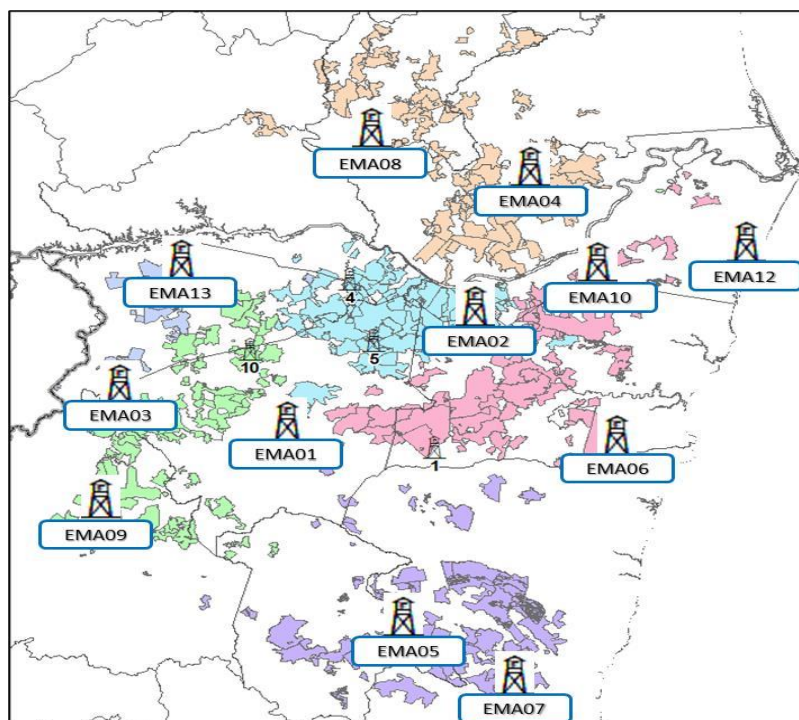


Figura 1– Distribuição das estações meteorológicas na área.

Para fins de manejo, cada sítio foi subdividido em duas categorias (1 e 2) de acordo com a capacidade de retenção de água do solo, de maneira que, por exemplo, o Sítio A1 apresenta melhor condição de armazenamento hídrico que o A2, e assim por diante. As subdivisões resultam em oito classes: A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1, D2, como pode ser observado na Figura 2.

Nesta pesquisa, foram reunidas as subdivisões em classe somente com o primeiro nível categórico. Desta forma, com base nas médias de precipitação, os locais de cultivo foram classificados em quatro diferentes “sítios” (Figura 2). A variação ocorreu do litoral para o interior do continente e foram divididas da seguinte forma:

- **Sítio A:** ≥ 1.250 mm;
- **Sítio B:** entre 1.250 e 1.150 mm;
- **Sítio C:** entre 1.150 e 1.050 mm;
- **Sítio D:** ≤ 1.050 mm.

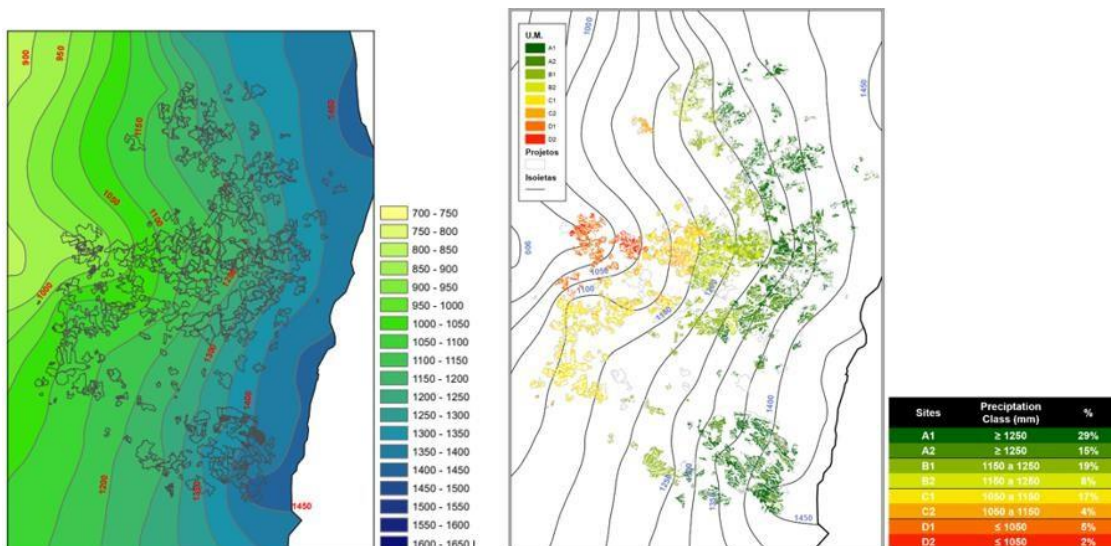


Figura 2– Distribuição de zonas de precipitação que deram origem aos sítios.

3.2 Coleta e análise do solo

3.2.1 Metodologia de coleta

A unidade de área de manejo florestal adotada pela empresa é denominada de talhão e foi utilizada como unidade básica de amostragem. Talhões com áreas menores que cinco hectares foram agrupados formando uma única unidade amostral. O número necessário de pontos de coleta de amostras simples por talhão foi definido conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Definição do número de amostras de acordo com o tamanho da área.

Classe de Área	Número de Amostras Simples
< 10 há	10 pontos
10 – 30 há	15 pontos
> 30 há	20 pontos

As amostras de solo foram coletadas nas camadas 0-20 e 20-40 cm. Os teores de fósforo (P) e potássio (K) foram determinados pelo método de extração Mehlich-1, com os resultados expressos em miligrama por decímetro cúbico (mg/dm^{-3}). Os cátions cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio (Al^{3+}) foram extraídos com solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L^{-1} , e seus teores expressos em centímol de carga por decímetro cúbico ($\text{cmolc}/\text{dm}^{-3}$). A acidez potencial, representada por $(\text{H} + \text{Al})$, foi determinada por

extração com acetato de cálcio a $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, também com resultados em cmolc/dm^{-3} . O pH do solo foi medido em água, utilizando a proporção de 1:2,5 entre solo e água, sem unidade adimensional.

A matéria orgânica do solo foi estimada pelo método de Walkley e Black (1934), sendo calculada pela multiplicação do teor de carbono orgânico por 1,724, e expressa em décimo de grama por quilograma (dag kg^{-1}). O fósforo remanescente (P-rem) foi avaliado com base na concentração de fósforo em uma solução de equilíbrio contendo CaCl_2 10 mmol L^{-1} e 60 mg L^{-1} de P, após agitação da amostra por uma hora na proporção 1:10 solo:solução, com resultados expressos em mg L^{-1} . O enxofre na forma de sulfato (S- SO_4) foi determinado segundo a metodologia de Hoef et al. (1973), utilizando como extrator uma solução de fosfato monocalcário [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] 500 mg L^{-1} em ácido acético 2 mol L^{-1} .

Os micronutrientes zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e cobre (Cu) foram extraídos com solução DTPA, enquanto o boro (B) foi determinado por extração com água quente; todos expressos em mg/dm^{-3} . A soma de bases (SB) foi obtida pela adição dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ , expressa em cmolc/dm^{-3} . A capacidade de troca catiônica efetiva (t) foi calculada como a soma da SB com Al^{3+} , e a CTC a pH 7 (T) como a soma da SB com (H + Al), ambas em cmolc/dm^{-3} . A saturação por alumínio (m) foi expressa em percentual, calculada como 100 vezes Al^{3+} dividido pela CTC efetiva, enquanto a saturação por bases (V) foi calculada como 100 vezes SB dividido pela CTC a pH 7, também em porcentagem.

3.3.2 Manejo de adubação adotado

O manejo nutricional nos talhões foi conduzido com base nas análises de solo obtidas em campo e orientado por meio do sistema computacional NUTRICALC, desenvolvido para estimar o balanço nutricional e recomendar adubações específicas para cultivos de eucalipto em regiões tropicais. Este sistema leva em conta uma ampla gama de variáveis, como produtividade esperada, idade de corte, eficiência de uso de nutrientes pela cultura, tipo de manejo (implantação, reforma ou brotação), composição de resíduos florestais e características físico-químicas do solo (Tabela 2), permitindo personalizar as recomendações por talhão.

Tabela 2 – Dados requeridos pelo sistema NUTRICALC para estimar o balanço nutricional e recomendar fertilizações em cultivo.

Categoria	Parâmetros Requeridos
Dados do sítio florestal	Índice de sítio (produtividade esperada), idade de corte (rotatividade)
Dados da cultura do solo	Eficiência de uso de nutrientes, conteúdo de nutrientes na biomassa (tronco, copa, raízes)
Dados da cultura	Eficiência de uso de nutrientes, conteúdo de nutrientes na biomassa (tronco, copa, raízes)
Manejo da área	Informação sobre descascamento (campo ou fábrica), quantidade e composição de resíduos florestais, tipo de operação (implantação, reforma, rebrote)
Insumos e economia	Tipos e preços dos fertilizantes, fontes disponíveis de P, necessidade de S, B e Zn, produto final e seu valor de mercado

Com base nas diretrizes do *software* e nos resultados das análises laboratoriais, o manejo de adubação foi dividido em três etapas: adubação de base, adubação de cobertura e/ou reforço e aplicação com cinza-cálcio-magnésio.

A adubação de base foi realizada como parte das operações que compõem o preparo de solo pré-plantio, devendo ser distribuído em filete contínuo ao longo da linha de subsolagem o fertilizante NPK 12:20:16 + 0,8%B + 0,5%Cu + 0,5%Zn ou NPK 12:20:16 + 0,5%B + 0,5%Cu + 0,5%Zn + 1,5%Mn. A dose recomendada variou de 350 a 450 kg ha⁻¹, em função dos resultados de análise do solo.

Para as áreas de reforma/implantação, a adubação foi realizada entre 9 e 12 meses após o plantio (com controle prévio de plantas daninhas na linha de plantio, se necessário), aplicação de fertilizantes NPK 00-00-54 + 1% B ou NPK 10:00:30 +0,5%B. Doses médias recomendadas variaram entre 150 e 450 kg/ha para o KCl+1%B e 200 a 500 kg/ha para o NPK 10:00:30+0,5%B. A aplicação destes fertilizantes foi realizada em filete contínuo, utilizando-se adubadeira mecanizada tracionada por trator de pneu, aplicando-se o fertilizante no solo entre 20 e 120 cm de distância do tronco (no caso de áreas de implantação e reforma) e de 20 a 80 cm (para áreas de brotação).

Em função dos resultados de análise do solo, foi aplicada uma dose de cinza-

cálcio-magnésio 40:4 (CCM 40:4) ou cinza-cálcio-magnésio 38:8 (CCM 38:8), distribuindo o produto na entrelinha de plantio, no período de 2 meses antes do corte até 4 meses após o plantio, no caso de áreas de implantação ou reforma, e até 6 meses após a data de início da rotação, para áreas de brotação. Doses médias recomendadas variaram entre 1.000 e 2.800 kg/ha.

3.3 Análise estatística

Os dados foram avaliados quanto à normalidade dos resíduos (5% de significância). Para os dados que apresentaram normalidade, foi ajustado um modelo linear misto geral (efeito fixo das isolinhas de precipitação, ciclo do eucalipto e efeito aleatório da amostragem). As médias foram comparadas pelo teste de Fisher (LSD) a 5% de significância com auxílio dos *softwares* StatSoft Statistica® versão 12.0 (Statsoft, 1974-2009) e Sigmaplot® v.14.0. (Systat, 2010) para construção dos gráficos. Foram avaliadas as variações entre os ciclos, profundidades de solo e zonas de precipitação. Nos casos em que não houve diferença significativa entre as profundidades, os dados foram agrupados e analisados de forma geral.

Para demonstrar as variações de múltiplos atributos em um mesmo ponto geográfico e facilitar a comparação entre variáveis, foi utilizado um mapa temático com gráfico de setores (Pie Chart Map) através do *software* QGIS 3.16. Os gráficos apresentados utilizam símbolos proporcionais em pares de cores para representar a variação espacial de atributos químicos do solo (SB – soma de bases, MO – matéria orgânica e CTC – Capacidade de troca catiônica) na profundidade de 0–20 cm, comparando dois momentos: início do plantio (1º ciclo) e ciclo atual (geralmente 4º ou 5º ciclo, após cerca de 25–30 anos). Cada ponto do mapa representa uma área amostrada. O tamanho das figuras é proporcional à magnitude do valor medido, conforme as faixas indicadas na legenda. A base cartográfica contém a distribuição dos tipos de solo conforme o Sistema brasileiro de classificação de solos disponíveis na base do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que permite associar a dinâmica dos atributos químicos à variabilidade edáfica regional (Santos et al., 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Variação dos elementos do solo ao longo dos ciclos em diferentes profundidades do solo

Os resultados evidenciam padrões distintos de acúmulo e redistribuição de nutrientes no solo ao longo das rotações de eucalipto, com destaque para os cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+), o fósforo (P), a capacidade de troca de cátions (CTC), a matéria orgânica (MO) e a acidez do solo (pH). Os teores de cálcio (Figura 4H) apresentaram diferenças entre os ciclos e entre as profundidades avaliadas. Na camada de 0–20 cm, observou-se um aumento acentuado no teor de Ca até o 3º ciclo, seguido por uma leve redução no 4º e 5º ciclo. A presença de resíduos florestais provenientes do descascamento em campo pode ter contribuído para esse incremento por meio da mineralização da casca e dos galhos, ricos em cátions básicos como o Ca^{2+} (Mendham et al., 2011). A camada de 20–40 cm apresentou o mesmo padrão de aumento, no entanto com teores inferiores em todos os ciclos, confirmando a menor mobilidade vertical do Ca no perfil do solo e a influência predominante de entradas superficiais.

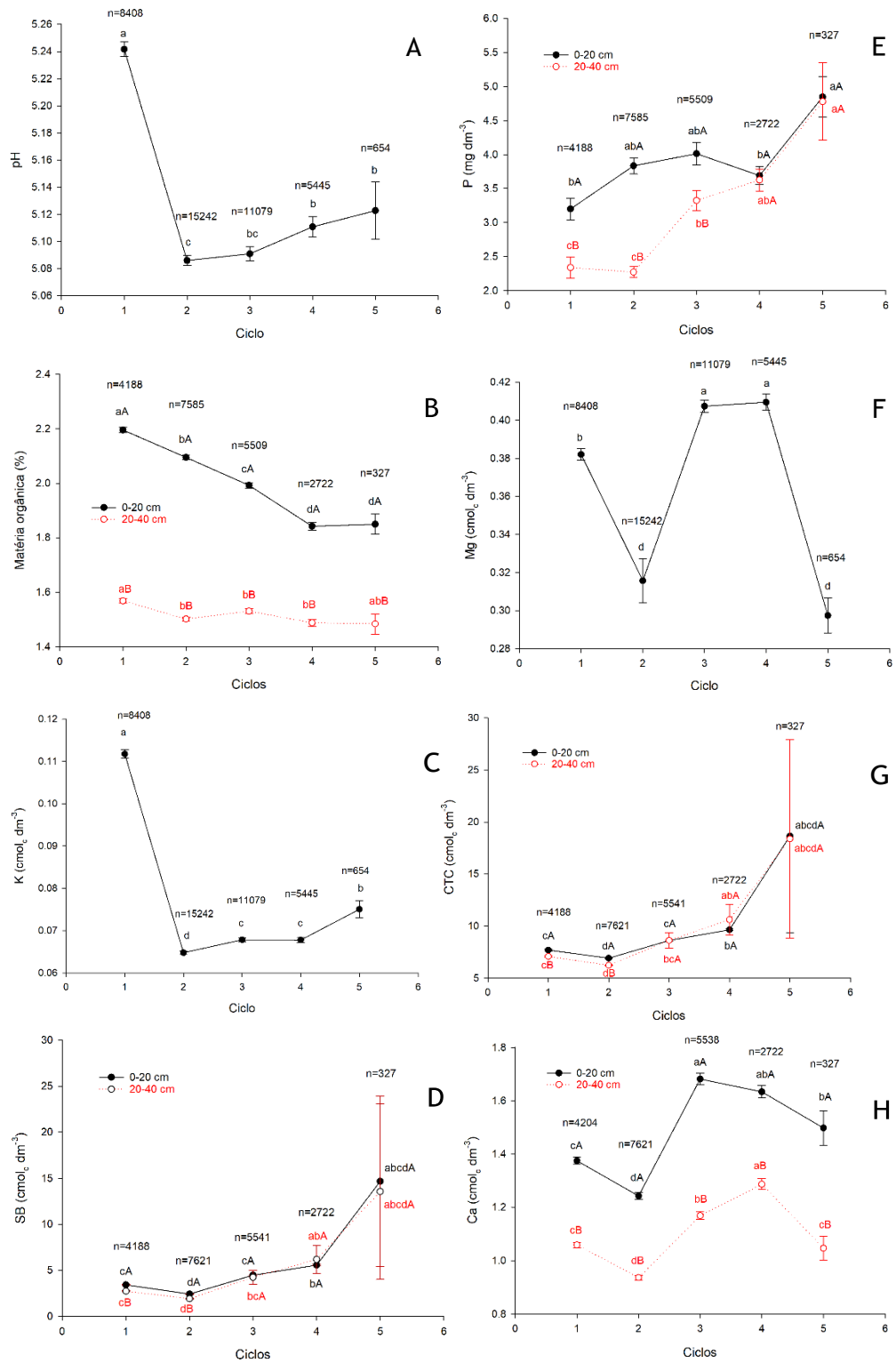


Figura 3– Indicadores de fertilidade em relação aos ciclos de plantio em duas profundidades do solo. P: fósforo; MO: matéria orgânica; MG: magnésio; K: potássio; CTC: capacidade de troca de cátions; Ca: cálcio e SB: soma de bases; n: número de amostragens. Letras maiúsculas comparam as profundidades e minúsculas, os ciclos pelo teste de Fisher (LSD, 5%).

A CTC (Figura 3.G) apresentou elevação consistente ao longo dos ciclos, com destaque para os últimos (4º e 5º), independentemente da profundidade. Esse comportamento é indicativo do aumento gradual de material orgânico coloidal e, possivelmente, do acúmulo de bases provenientes da ciclagem dos resíduos mantidos sobre o solo após cada colheita (Tan et al., 2024). A persistência de resíduos florestais e o sombreamento natural da floresta também podem ter reduzido as perdas por erosão e lixiviação, favorecendo o acúmulo de cargas de troca.

Os teores de potássio (Figura 3C) apresentaram queda abrupta do 1º para o 2º ciclo, seguida de leve recuperação até o 5º. A alta solubilidade do K e sua rápida mobilização por lixiviação em ambientes tropicais justificam esse padrão, particularmente após a substituição da pastagem inicial, cuja cobertura radicular mais rasa e pobre em K deixou o solo suscetível à exportação acelerada (Cook et al., 2016). A manutenção dos resíduos florestais, principalmente folhas e ramos finos, pode ter contribuído para o aumento do K nas rotações mais recentes, uma vez que esses compartimentos são ricos nesse nutriente e se decompõem rapidamente.

O Mg foi pouco estável ao longo das rotações, com oscilações significativas principalmente no 2º e 5º ciclos (Figura 3.F). A tendência geral reflete uma possível reposição parcial via resíduos florestais e adubação corretiva. Tal como o Ca, o Mg é liberado a partir da decomposição da casca, folhas e galhos (Hernandez et al., 2016), sendo também menos suscetível à lixiviação que o K.

A MO do solo (Figura 3B) mostrou queda progressiva ao longo dos ciclos na camada de 0-20 cm, de 2,2% para menos de 1,9% no 5º ciclo. Apesar da manutenção dos resíduos do eucalipto no campo, a conversão de pastagem para floresta e o tempo de uso intensivo da área favorecem a mineralização da matéria orgânica preexistente, especialmente nos primeiros anos (Barros et al., 1995). O preparo de solo expõe a MO protegida fisicamente em agregados ao ataque microbiano, e a oclusão da MOS dentro dos agregados age como um escudo físico: limita o oxigênio e impede que microrganismos e suas enzimas alcancem o substrato, retardando a decomposição (Dieckow et al., 2004). Segundo Guo et al. (2025), esse mecanismo de proteção reduz a mineralização, especialmente sob estresse térmico crescente. Desta forma, quando os agregados são quebrados, há uma maior taxa de decomposição e, conseqüentemente, perdas de MO.

A estabilidade da MO na camada de 20–40 cm indica que os resíduos depositados superficialmente tiveram pouco efeito sobre as camadas subsuperficiais, reforçando a importância do manejo da cobertura do solo e de adições de compostos orgânicos de

maior recalitrância. Importa destacar que a conversão de pastagem para floresta contribui inicialmente para o aumento da atividade biológica e ciclagem de nutrientes (Xu et al., 2020), especialmente quando há adição significativa de resíduos orgânicos na superfície.

O fósforo aumentou de forma contínua ao longo das rotações, especialmente no 5º ciclo (Figura 3.E). Isso pode estar associado tanto à adubação fosfatada quanto à liberação de P por mineralização dos resíduos florestais mantidos no campo após o descascamento. O P, ao contrário do K, apresenta baixa mobilidade no solo, sendo sua disponibilidade altamente influenciada pela competição por sítios de adsorção e acúmulo de MO superficial (Hernandez et al., 2016; Xu et al., 2020; Tan et al., 2024).

Os valores de pH (Figura 3A) oscilaram pouco entre os ciclos, mantendo-se na faixa de 5,08 a 5,24. Após a queda observada no 2º ciclo, observou-se discreta recuperação, provavelmente associada à decomposição de resíduos com efeito neutralizante. A conversão de pastagem para eucalipto frequentemente leva à acidificação inicial, agravada pela exportação de bases. No entanto, o retorno parcial de cátions com os resíduos e o uso de calcário explicam a tendência de recuperação (Mendham et al., 2008).

A saturação por bases (SB) apresentou um aumento substancial ao longo das últimas rotações (Figura 3D), passando de menos de 5 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no 1º e 2º ciclos para mais de 15 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no 5º ciclo. Essa tendência positiva está fortemente associada ao efeito acumulativo da ciclagem biogênica de nutrientes, promovida pela decomposição dos resíduos florestais mantidos no campo após o descascamento. Os nutrientes provenientes da adição de resíduos lenhosos e foliares são mineralizados em cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+), contribuindo significativamente para a elevação progressiva da fertilidade do solo (Gonçalves et al., 2012; Xu et al., 2020; Tan et al., 2024). Além disso, esse manejo favorece a melhoria das propriedades químicas da camada superficial, reforçando a importância de estratégias de manejo que priorizem a conservação dos resíduos orgânicos *in situ*.

A análise dos atributos químicos do solo ao longo de cinco ciclos sucessivos de eucalipto revelou padrões consistentes de melhoria em diversos indicadores de fertilidade, sobretudo quando consideradas as práticas adequadas de adubação de base e manutenção ao longo das rotações. A presença constante de resíduos florestais sobre o solo, resultante do descascamento no campo durante a colheita, associada à reposição correta de nutrientes, favoreceu o acúmulo progressivo de Ca^{2+} , Mg^{2+} , P, bem como o incremento

na capacidade de troca de cátions (CTC) e na soma de bases (SB) (Xu et al., 2020; Tan et al., 2024).

Apesar disso, observou-se redução nos teores de matéria orgânica (MO) e potássio disponível (K) nos primeiros ciclos, sugerindo que tais efeitos estão mais relacionados ao histórico de uso anterior como pastagem (Cook et al., 2016) e à alta mobilidade do K em ambientes tropicais (Mendham et al., 2011). A recuperação progressiva do pH e a elevação da CTC indicam que os benefícios do manejo se acumulam com o tempo, principalmente quando há manutenção contínua de resíduos vegetais e melhoria da cobertura orgânica superficial (Gómez-Rey et al., 2010).

A análise da variação percentual dos atributos químicos do solo (Tabela 3) entre o primeiro ciclo de eucalipto e os ciclos mais atuais (quarto ou quinto ciclo) indica uma dinâmica complexa e bem equilibrada da fertilidade do solo em sistemas onde há adubação regular e manutenção dos resíduos florestais no campo. A elevação nos teores de cálcio (+17%), magnésio (+16%), fósforo (+11%), além do aumento expressivo na soma de bases (SB: +63%) e na capacidade de troca catiônica (CTC: +29%), indica uma relação positiva entre a reposição via fertilização e a ciclagem biogeoquímica dos resíduos orgânicos (folhas, cascas, galhos). De fato, a decomposição da serapilheira contribui para a liberação gradual de nutrientes essenciais, reforçando a capacidade de retenção de cátions e melhorando a estrutura e funcionalidade do solo (Santos et al., 2024).

Tabela 3 – Variação da média geral dos atributos químicos do solo na camada de 0–20 cm entre o primeiro e o ciclo mais recente de cultivo de eucalipto. Ca: cálcio ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$); Mg: magnésio ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$); P: fósforo (cmol/dm^3); K: potássio ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$); SB: soma de bases ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$); Matéria orgânica: teor de matéria orgânica do solo (%) CTC: capacidade de troca catiônica a pH 7,0 ($\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$), pH: potencial hidrogeniônico (unidade de pH em H_2O).

	Ca $\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$	Mg $\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$	P mg/dm^3	K $\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$	SB $\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$	Matéria orgânica %	CTC $\text{cmol}_a\text{c}/\text{dm}^3$	pH
Média início	1,41	1,21	0,0502	1,28	3,42	2,23	7,64	5,33
Média final	1,65	1,44	0,0555	1,05	5,58	1,99	9,84	5,21
Variação (%)	17%	16%	11%	-18%	63%	-11%	29%	-2%

Mesmo na ausência de calagem, a estabilidade do pH (-2%) sugere um ambiente tamponado e equilibrado. Esse comportamento está em linha com os achados de Simões et al. (2025), ao destacarem que, em plantações de eucalipto com regeneração natural e cobertura contínua de resíduos, o solo tende a manter sua acidez dentro de uma faixa tolerável para a maioria dos nutrientes, sem comprometer a absorção radicular.

Em relação ao potássio, foi observada uma queda acentuada (-18%). Nutriente de alta mobilidade no solo, o K pode ser rapidamente lixiviado, especialmente em solos tropicais ou sob fortes regimes pluviométricos. Sua ciclagem natural também é mais limitada do que Ca ou Mg, o que exige ajustes constantes na forma e frequência de aplicação para mitigar perdas e garantir a continuidade produtiva (Gomes et al., 2024). Já a redução da matéria orgânica (-11%), embora moderada, sugere que a taxa de decomposição pode estar superando o aporte, o que é comum em sistemas com elevado turnover biológico (Li et al., 2023). Isso pode afetar negativamente a retenção de nutrientes e a estabilidade de agregados, exigindo, talvez, a introdução de espécies de cobertura ou práticas conservacionistas para reverter esse quadro a longo prazo.

4.2 Variação dos elementos do solo ao longo dos ciclos em diferentes faixas de pluviosidade

Os dados foram avaliados considerando-se as diferentes classes de chuva. Desse modo, os teores de cálcio trocável (Ca^{2+}) (Figura 4.D) apresentaram-se mais elevados nas áreas submetidas a precipitações inferiores a 1.050 mm, sobretudo nos ciclos mais recentes de cultivo (3° e 4°). Esse comportamento indica menor intensidade dos processos de lixiviação, permitindo o acúmulo gradual de bases trocáveis no solo ao longo dos anos (Rodrigues et al., 2019). Em contrapartida, o aumento do regime pluviométrico para a faixa de 1.050–1.250 mm resultou em uma redução acentuada nos teores de Ca^{2+} , o que sugere uma intensificação da perda de cátions por percolação (Xu et al., 2020). Curiosamente, em áreas com precipitações superiores a 1.250 mm, observou-se uma recuperação parcial dos teores, notadamente nos ciclos mais recentes. Tal resposta pode estar relacionada à ciclagem interna de nutrientes, favorecida pelo aporte de resíduos orgânicos e pela atividade de raízes finas na superfície e em camadas subsuperficiais (Yang et al., 2024).

A capacidade de troca catiônica (CTC) (Figura 4G) foi superior nos ciclos intermediários em regiões com baixa precipitação, revelando boa capacidade de retenção

de nutrientes neste intervalo. Entretanto, sob chuvas intermediárias (1.050–1.150 mm), os valores de CTC diminuíram de forma significativa, o que evidencia maior suscetibilidade à perda de nutrientes pela ação da água, particularmente em solos com baixa saturação por bases (Mendham et al., 2011). Nos ciclos mais avançados (>3) em ambientes mais úmidos, a CTC apresentou recuperação moderada, provavelmente impulsionada pelo acúmulo progressivo de matéria orgânica e o desenvolvimento de sistemas radiculares mais profundos e eficientes na retenção de nutrientes (Sandoval López et al., 2020).

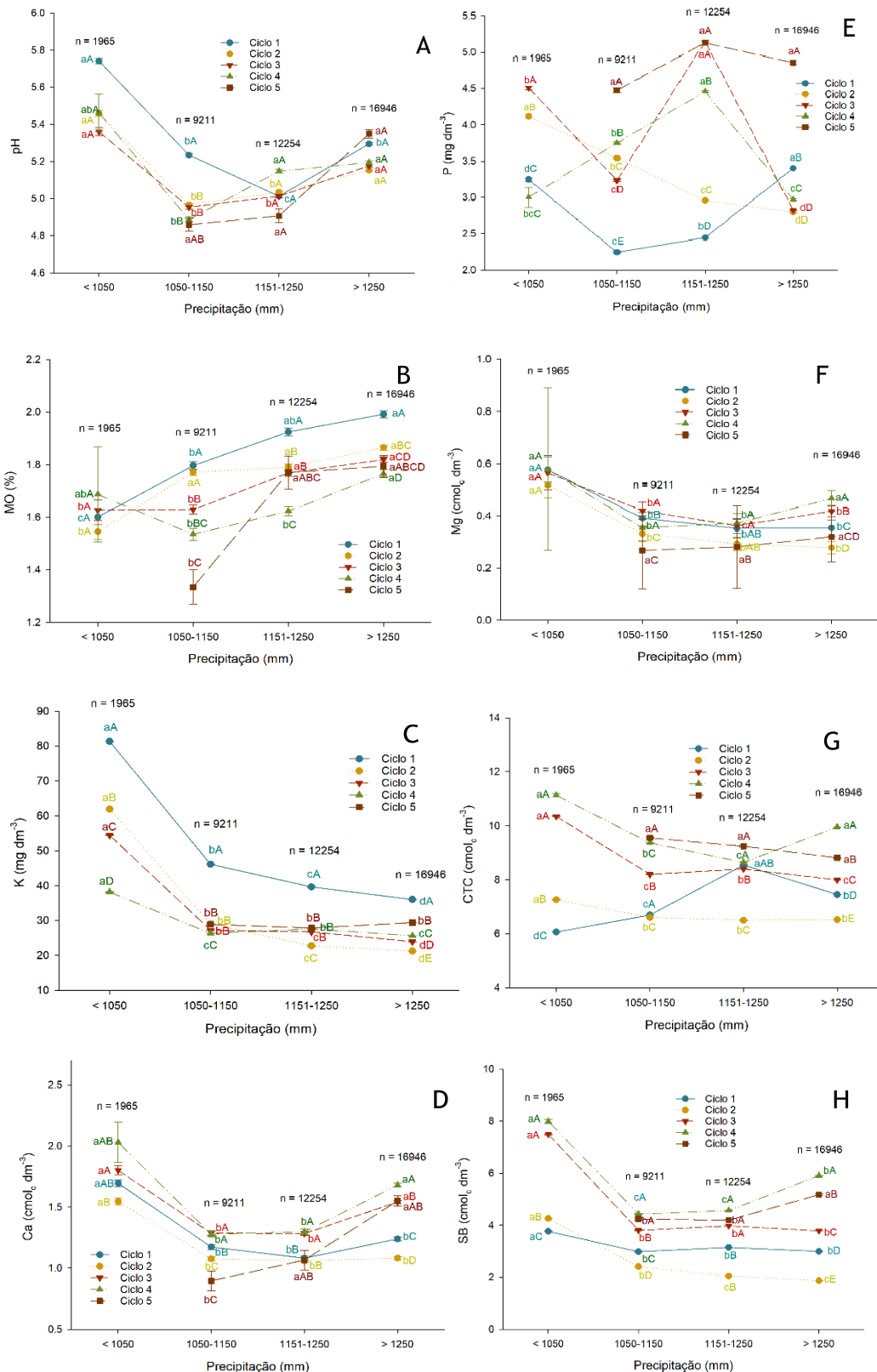


Figura 4– Variação dos teores dos elementos do solo em relação à precipitação e aos ciclos de cultivo. P: fósforo; MO: matéria orgânica; MG: magnésio; K: potássio; CTC: capacidade de troca de cátions; Ca: cálcio e SB: soma de bases; n: número de amostragens. Letras maiúsculas comparam a diferenças entre os ciclos e minúsculas, entre as faixas de precipitação pelo teste de Fisher (LSD, 5%).

O potássio trocável (K^+) (Figura 4C) demonstrou elevada sensibilidade ao incremento das chuvas. A drástica redução dos teores já nos ciclos iniciais ($<50 \text{ mg dm}^{-3}$ após 1.050 mm de precipitação) reforça o comportamento altamente móvel desse nutriente no perfil do solo, sendo prontamente lixiviado em condições de excesso hídrico (Hoogar et al., 2019). Por outro lado, os ciclos mais recentes apresentaram menor variabilidade nos teores de K, o que pode refletir a adoção de práticas de manejo nutricional mais ajustadas ou ainda uma adaptação fisiológica da cultura à disponibilidade limitada do nutriente.

Os teores de magnésio trocável (Mg^{2+}) (Figura 5F) seguiram tendência semelhante à do cálcio (Figura 4D), com decréscimo nas faixas intermediárias de precipitação e posterior recuperação nos ciclos 3 e 4. Tal padrão evidencia que o Mg^{2+} também é fortemente influenciado pela lixiviação, mas sua reposição pode ser favorecida pela mineralização da biomassa radicular e da serapilheira (Tan et al., 2024). Assim, a continuidade do uso do solo ao longo de vários ciclos reforça a necessidade de atenção redobrada à reposição de Mg^{2+} , de modo a evitar déficits nutricionais progressivos.

A matéria orgânica (MO) apresentou acúmulo ao longo dos ciclos e foi positivamente correlacionada com o regime pluviométrico (Figura 4B). O aumento dos teores de matéria orgânica (MO) em solos sob plantios de eucalipto em regiões tropicais está fortemente associado a regimes pluviométricos mais elevados. Em condições de maior precipitação, há produção intensificada de biomassa aérea e subterrânea, com consequente acúmulo de resíduos orgânicos — como folhas, galhos finos e raízes em senescência — sobre e dentro do solo. Essa deposição contínua, somada à umidade favorecida pelo regime hídrico, estimula a atividade microbológica, a decomposição parcial da serapilheira e a formação de substâncias húmicas estáveis, que se acumulam nas camadas superficiais. Como resultado, solos sob florestas plantadas de eucalipto em ambientes úmidos tendem a apresentar maior acúmulo de carbono orgânico, especialmente nos horizontes superficiais, em comparação a áreas com menor índice pluviométrico (Yang et al., 2019).

Esse processo é amplamente documentado em regiões tropicais úmidas, onde a interação entre elevada produção primária e ciclos rápidos de decomposição sustenta níveis crescentes de carbono orgânico no solo ao longo dos ciclos de cultivo florestal. Resultados de meta-análises indicam que plantios de eucalipto em áreas com precipitação acima de 1.250 mm/ano apresentam teores de MO superiores a regiões com precipitação menores, sobretudo nas primeiras camadas do solo (Yang et al., 2019; Sandoval López et

al., 2020). Essa dinâmica evidencia a importância de considerar o regime hídrico como variável-chave no planejamento florestal e no manejo da fertilidade dos solos tropicais.

Entretanto, verificou-se uma redução mais acentuada nos teores de matéria orgânica (MO) e de potássio (K^+) nos primeiros ciclos de cultivo. Essa tendência parece estar mais associada ao uso anterior da área como pastagem, o que resulta em baixa estabilidade da MO remanescente e elevada suscetibilidade à lixiviação de nutrientes, especialmente em solos tropicais. A conversão de pastagem para sistema florestal acarreta, nos primeiros anos, uma intensificação da atividade microbiana e da mineralização da matéria orgânica, sem reposição imediata equivalente (Zhou et al., 2019; Yang et al., 2024).

A disponibilidade de fósforo (P) apresentou oscilações, com picos em ambientes com precipitação entre 1.150–1.250 mm e maiores teores no ciclo 5 (Figura 4E), indicando que não há uma relação clara entre P e pluviosidade e ciclos nos dados deste estudo, pois o mesmo pode ter sofrido mais influência das características intrínsecas do solo, como material de origem e textura, do que propriamente das variáveis estudadas, uma vez que esses fatores explicam parte da variabilidade global do P no solo (He et al., 2021).

O comportamento do pH seguiu uma distribuição em “U”, com valores mais elevados nas extremidades do gradiente de precipitação (Figura 4A). As áreas com precipitação moderada (1.050–1.250 mm) exibiram maior acidificação, especialmente nos ciclos mais antigos, efeito atribuído à maior exportação de cátions via colheita e lixiviação, além da decomposição intensiva da matéria orgânica acumulada (Gómez-Rey et al., 2010; Yang et al., 2024).

A soma de bases (SB) seguiu tendência semelhante à dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , com maiores valores observados nas áreas com precipitação inferior a 1.050 mm e nos ciclos mais recentes (Figura 4H). As menores SB foram registradas em regimes intermediários de chuva, mas houve recuperação parcial nos ciclos 4 e 5, sobretudo em ambientes úmidos, sugerindo que a ciclagem de nutrientes desempenha papel central na recomposição do equilíbrio de bases no solo (Zhou et al., 2020).

A variação da soma de bases (SB) acompanha diretamente os efeitos combinados de precipitação sobre a ciclagem e a perda de nutrientes. Em regiões de menor pluviosidade, a menor lixiviação favorece a manutenção de bases no sistema e reduz a velocidade de decomposição da matéria orgânica, o que contribui para maior estabilidade da SB. Nas

áreas intermediárias (1.050–1.250 mm), a precipitação é suficiente para intensificar a lixiviação, mas sem alcançar níveis de produtividade e ciclagem de serapilheira capazes de compensar essas perdas, resultando em queda acentuada da SB. Já nos sítios ambientes de maior pluviosidade, apesar do aumento natural da lixiviação, o clima mais quente e húmido favorecer a elevada taxa de decomposição e ciclagem de nutrientes, o que, aliado à alta produtividade dos plantios, gera aporte constante de nutrientes e o acúmulo progressivo de matéria orgânica aumenta, o que permite a recuperação relativa da SB ao longo dos ciclos (Sun et al., 2024).

De forma geral, a análise dos atributos químicos do solo evidencia a profunda influência exercida pela precipitação e pelo tempo de uso (número de rotações) sobre a fertilidade em plantios de eucalipto. Nutrientes móveis, como K^+ e Ca^{2+} , são fortemente impactados pelo aumento das chuvas, enquanto elementos menos móveis, como o fósforo, não demonstraram padrão. Por sua vez, a matéria orgânica e a CTC tendem a aumentar com o aumento dos ciclos, reforçando que práticas sustentáveis de manejo, incluindo a manutenção de resíduos vegetais, são cruciais para assegurar a longevidade produtiva e a sustentabilidade edáfica dos sistemas florestais (Xu et al., 2020; Mendham et al., 2011).

4.3 Variação espacial dos atributos do solo

A presença de aumentos significativos de SB na maioria dos locais (Figura 5), mesmo em solos predominantemente distróficos, sugere um efeito acumulativo da ciclagem de nutrientes promovida por resíduos vegetais, aliado à adubação regular conforme análise de solo.

Em áreas de Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, que são os mais amplamente distribuídos no mapa (região central e sul), observa-se uma elevação expressiva da SB em muitos pontos, com círculos vermelhos visivelmente do mesmo tamanho ou maiores do que os azuis. Esses solos, devido a sua baixa fertilidade natural, respondem positivamente à deposição de material orgânico e à presença contínua de raízes e resíduos florestais. A manutenção dos resíduos de colheita (folhas, cascas, galhos) tem papel crucial na liberação de cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+) e na melhoria da fração coloidal do solo, favorecendo o incremento da SB ao longo do tempo (Zanchi et al., 2021; Pitz et al., 2023).

Paes et al. (2014) reforçam essa afirmação em estudo no qual a manutenção dos resíduos da colheita (folhas, cascas, galhos) sobre o solo promoveu maior retenção hídrica, maior disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} provenientes da decomposição desses resíduos e consequente elevação da matéria orgânica e da capacidade de troca catiônica (CTC), favorecendo o aumento da soma de bases (SB) ao longo do tempo.

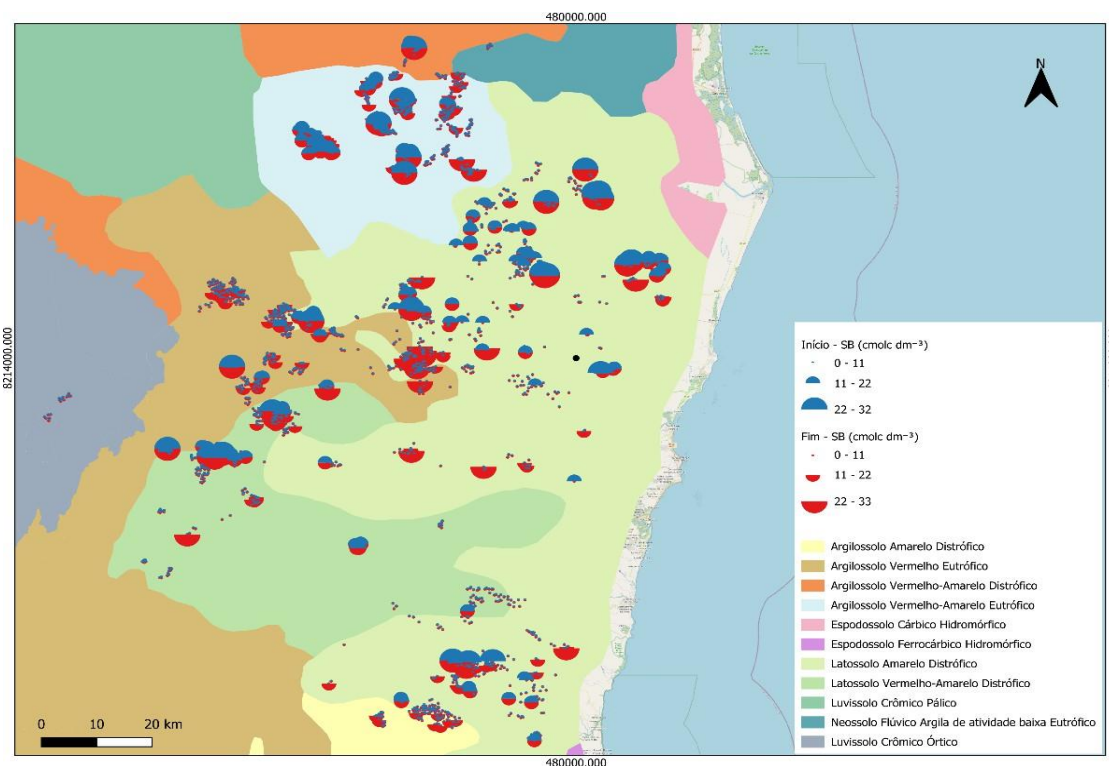


Figura 5 – Variação da soma de bases (SB) entre o primeiro ciclo e o mais atual em diferentes tipos de solo (0–20 cm de profundidade).

Nos Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos, localizados mais ao norte e oeste da área mapeada, também há tendência de aumento da SB, embora em menor escala que nos Latossolos. Isso pode estar relacionado à sua menor profundidade efetiva e maior suscetibilidade à lixiviação. Ainda assim, a presença de aumentos é indicativa de que o manejo florestal adotado – sem calagem, mas com reciclagem via serapilheira e adubação de manutenção – tem promovido melhorias relevantes na química do solo (Lima et al., 2010; Embrapa, 2021).

A avaliação espacial da matéria orgânica (MO) (Figura 6) revela uma tendência de redução em boa parte das áreas, especialmente sobre os Latossolos e Argissolos distróficos. O mapa evidencia essa dinâmica, com círculos vermelhos (valores finais) geralmente menores que os azuis (valores iniciais). Essa perda pode ser atribuída a processos de mineralização intensa, típicos de solos tropicais, e à mudança no tipo e na

qualidade do aporte orgânico ao longo dos ciclos.

Mesmo com o retorno dos resíduos de colheita ao solo (folhas, cascas e galhos), o volume e a decomposição desse material são distintos da cobertura herbácea anterior, e a maioria das áreas de cultivo era originalmente composta por pastagens, as quais forneciam grande quantidade de biomassa radicular e aérea de rápida decomposição (Silva, 2019). Essa condição histórica resultou em teores iniciais relativamente elevados de MO. Entretanto, com a transição para o sistema florestal, o aporte orgânico passou a ocorrer por meio de serapilheira lenhosa, com maior teor de lignina e menor relação C/N, o que dificulta a rápida incorporação de carbono no solo (José et al., 2023). Como evidenciado por Monteiro e Gama-Rodrigues (2004), esse efeito é comum em plantios de eucalipto em substituição a pastagens.

Por outro lado, análises complementares do presente estudo citadas anteriormente demonstram que, após um declínio inicial, os teores de matéria orgânica vêm se estabilizando ao longo dos ciclos mais recentes. Isso sugere que o sistema está alcançando um novo equilíbrio, sustentado pela deposição contínua de resíduos florestais e ausência de revolvimento do solo. A estabilização dos níveis da MO é um sinal positivo de que a ciclagem biogeoquímica está se ajustando às características do novo uso do solo, especialmente nos solos de textura média e argilosa (Gonçalves et al., 2012).

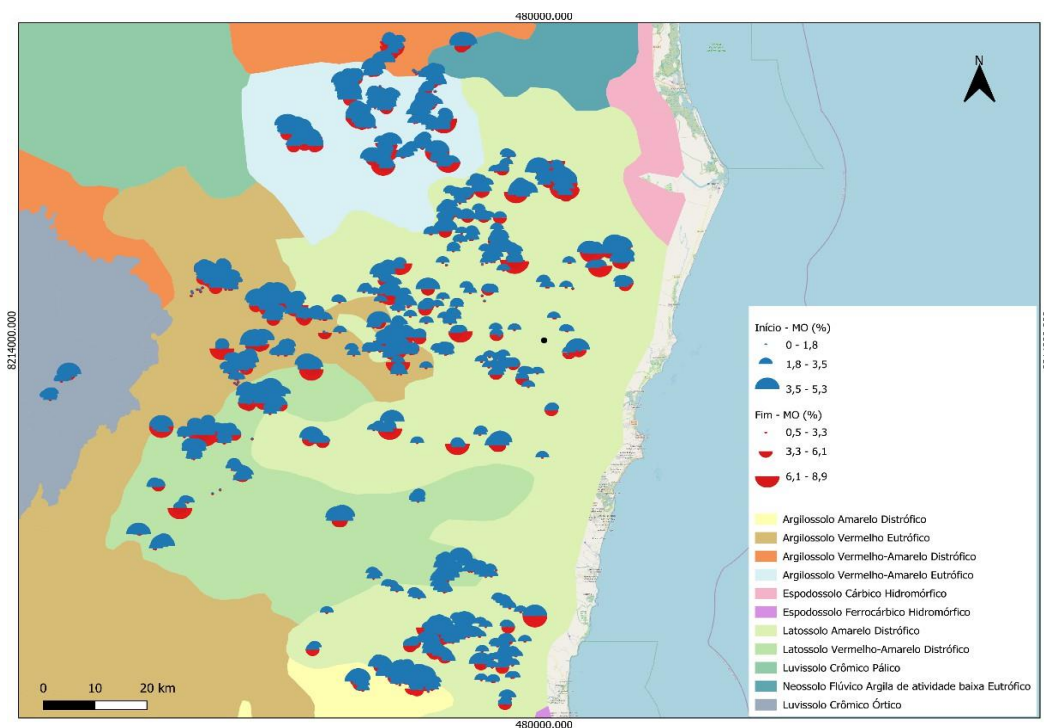


Figura 6 – Variação da matéria orgânica (MO) entre o primeiro ciclo e o mais atual em diferentes tipos de solo (0–20 cm de profundidade).

Ao considerar os diferentes tipos de solo presentes no mapa, observa-se que os Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, que ocupam a maior parte da área avaliada, apresentaram as maiores reduções relativas na MO (Figura 7). Isso pode ser explicado por sua maior atividade biológica, pela estrutura mais porosa e pela baixa proteção da matéria orgânica via complexação mineral, o que favorece a mineralização rápida da fração lábil (Embrapa, 2021) (Figura 6).

Com relação à capacidade de troca catiônica (CTC) (Figura 7), assim como a SB, a distribuição espacial demonstra que houve um aumento consistente da mesma entre o primeiro ciclo e o mais atual. Esse comportamento reflete o fortalecimento da capacidade do solo de reter e disponibilizar cátions essenciais à nutrição das plantas, o que está diretamente relacionado à qualidade da matéria orgânica e à estrutura físico-química do solo (Gonçalves et al., 2012).

Em Latossolos distróficos argilosos, predominantes na área de estudo, a maior proporção de argila e a intensa atividade biológica contribuem para uma rápida decomposição da MO, mas também facilitam a formação de complexos organominerais, que são responsáveis pela elevação da CTC e pela maior eficiência na retenção de bases.

Nos Argissolos eutróficos, a saturação por bases já naturalmente elevada, associada ao manejo de cultivo mínimo adotado, favoreceu a manutenção dos níveis de fertilidade ao longo dos ciclos. Em contrapartida, em solos como Neossolos Flúvicos e Espodosolos hidromórficos, onde a proteção física e química da MO é limitada, a resposta foi mais variável, com maior risco de perda de nutrientes por lixiviação (Donagemma et al., 2016; Embrapa, 2021).

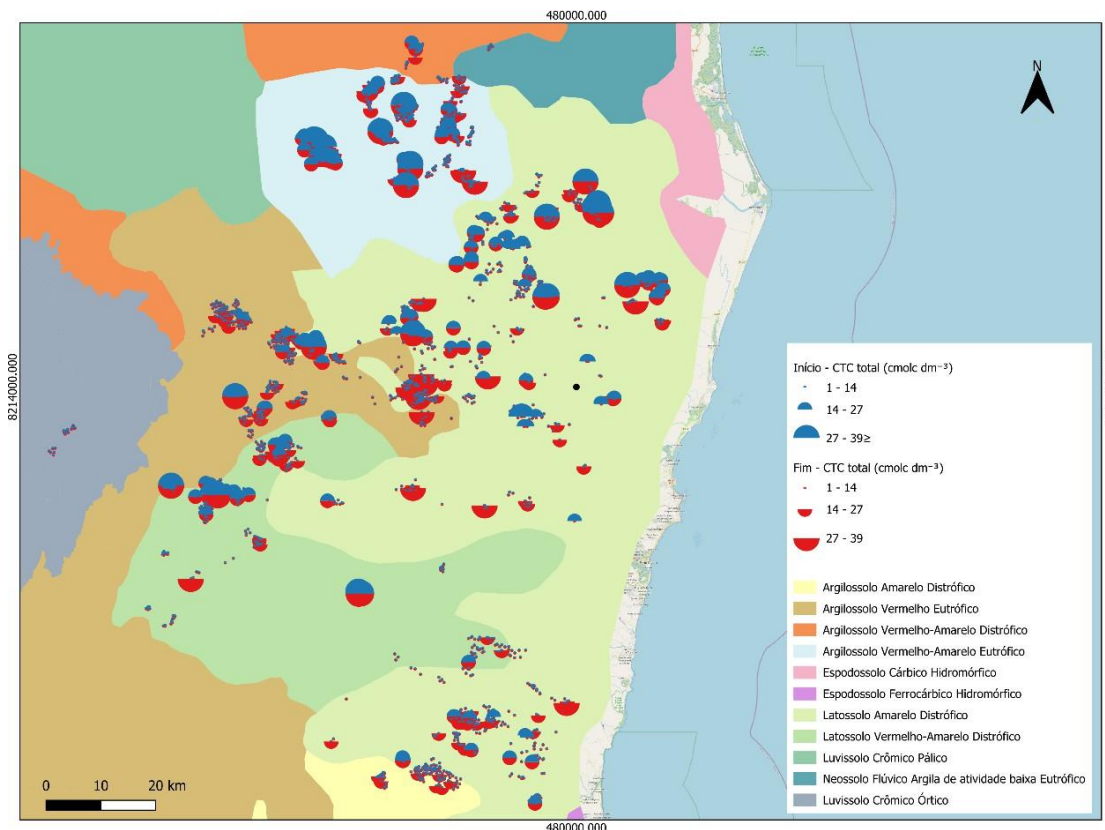


Figura 7– Variação da capacidade de troca catiônica (CTC) total entre o primeiro ciclo e o mais atual em diferentes tipos de solo (0–20 cm de profundidade).

Os Latossolos, amplamente distribuídos na região, apresentaram os maiores aumentos de CTC devido à sua elevada capacidade de complexação com matéria orgânica. Os Argissolos eutróficos também responderam positivamente, ainda que em menor intensidade. Já os Neossolos Flúvicos e os Espodossolos hidromórficos, com menor estabilidade mineralógica e menor teor de argila, mostraram resposta mais limitada, o que exige práticas de manejo conservacionistas para evitar perdas por lixiviação (Donagemma et al., 2016; Embrapa, 2021).

A dinâmica entre matéria orgânica (MO), soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC) revela uma melhoria na qualidade química do solo ao longo dos ciclos, na profundidade de 0–20 cm. A Figura 8 mostra que, embora os teores de matéria orgânica (MO) do solo tenham se mantido estáveis ou tenham reduzido em alguns locais ao longo dos ciclos, houve incremento expressivo na soma de bases trocáveis (SB) e na capacidade de troca de cátions (CTC), resultado da ciclagem de nutrientes promovida pelo sistema silvicultural e da manutenção de resíduos de colheita no campo, como folhas e galhos, que liberam gradualmente Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+} (Zanchi et al., 2021; Pitz et al., 2023).

Inicialmente, não foram observadas correlações entre MO × CTC e MO × SB, conforme a variação no tamanho dos semicírculos no diagrama, entretanto, ao final do ciclo, tais correlações tornaram-se notórias, com semicírculos de tamanho semelhante, indicando que áreas com maior MO também apresentaram maiores valores de CTC e SB, resultado também observado na Figura 9 para a relação MO × CTC. Esses padrões reforçam o papel da ciclagem biogênica e da reestruturação química promovida pelas raízes profundas do eucalipto (Laclau et al., 2010; Gatto, 2014), potencializados pela presença constante de resíduos vegetais e pela adubação baseada em análises de solo, que contribuem para a manutenção de frações orgânicas ativas.

Santana et al. (2020) demonstraram que a CTC de solos sob eucalipto pode ser prevista com alta correlação a partir do conteúdo de carbono orgânico total por métodos espectrais e aprendizado de máquina, e Guevara (2024) destacou que o manejo sustentável, como a adubação orgânica, promove aumento de MO e CTC, além de maior atividade biológica do solo.

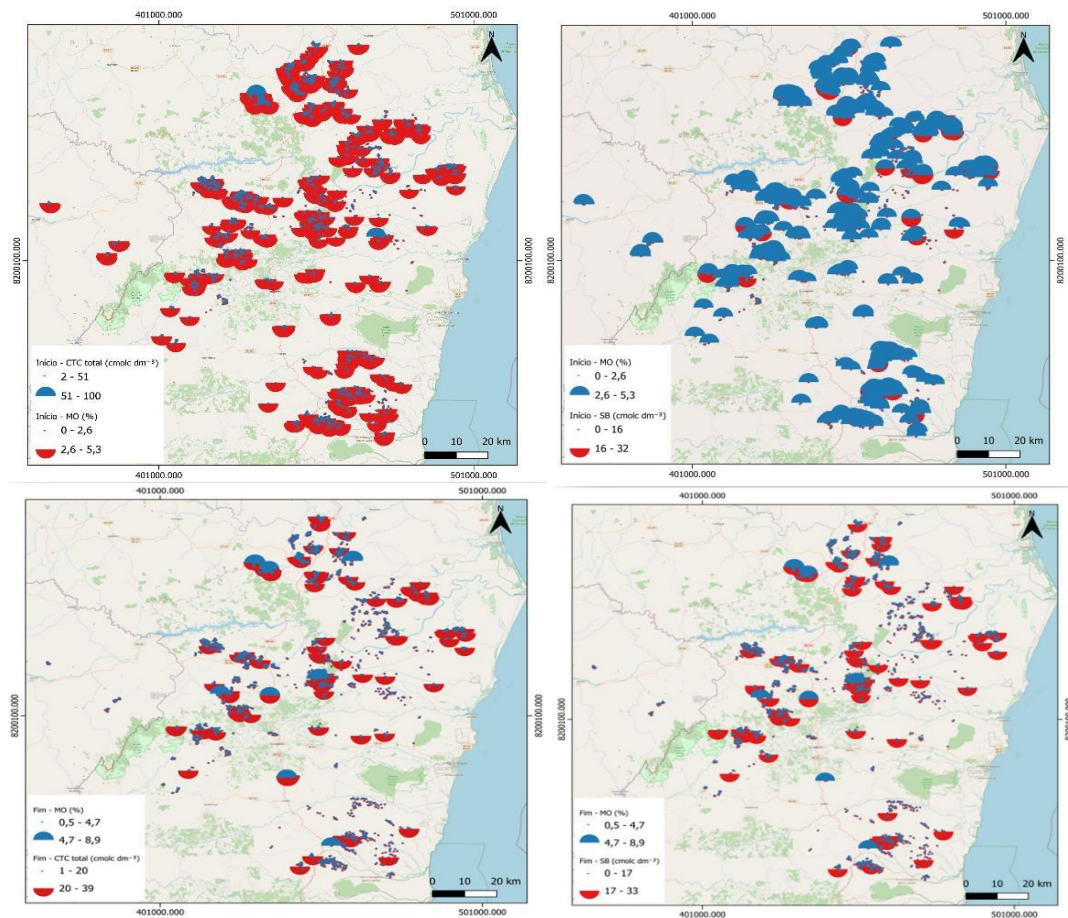


Figura 8 – Variação da matéria orgânica (MO), capacidade de troca catiônica (CTC) e soma de bases entre o primeiro ciclo e o mais atual (0–20 cm de profundidade).

Apesar de uma variação diferenciada observada nos mapas temáticos, a correlação dos dados de CTC e MO demonstrou uma relação positiva entre os elementos (Figura 9), indicando que os locais com maior teor de matéria orgânica apresentam tendência a ter maior capacidade de troca de cátions. Isso é biologicamente coerente, uma vez que a matéria orgânica, sobretudo os ácidos húmicos e fúlvicos, possuem grupos funcionais capazes de reter cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e outros nutrientes) por atração eletrostática. Isso a torna uma fonte relevante para a CTC, especialmente em solos altamente intemperizados, como os latossolos presentes neste estudo (Zanchi et al., 2021; Pitz et al., 2023).

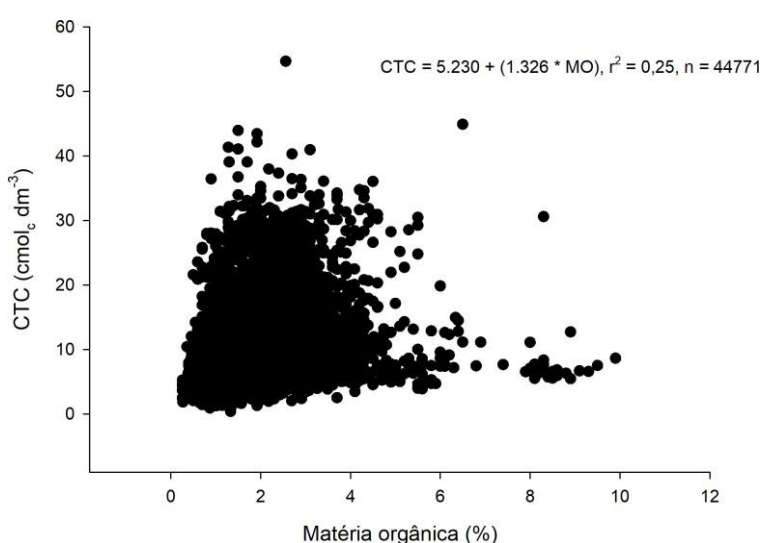


Figura 9 – O gráfico mostra uma análise de regressão entre a CTC e os resultados de matéria orgânica do solo.

Outro ponto importante é a história de uso anterior das áreas, majoritariamente sob pastagem, que pode ter influenciado os teores iniciais de matéria orgânica mais elevados. A estabilização observada nos últimos ciclos sugere que o sistema de manejo atual é capaz de promover recuperação e manutenção da fertilidade, por meio de processos naturais de ciclagem de nutrientes. Essa estabilidade se manifesta na manutenção do pH e na melhoria integrada da MO, da SB e da CTC, criando uma base edáfica mais resiliente e sustentável para os ciclos seguintes. Essa interação entre atributos, quando considerada em conjunto com os aspectos edafoclimáticos e a classificação dos solos, demonstra a importância do manejo diferenciado conforme as limitações e potencialidades de cada classe de solo.

5 CONCLUSÃO

A avaliação dos atributos químicos do solo ao longo de cinco ciclos sucessivos de eucalipto demonstrou que práticas consistentes de permanência de resíduos com deposição contínua de galhos, folhas e cascas durante a colheita, aliadas à reposição equilibrada de nutrientes via adubação, promoveram incremento de cálcio, magnésio, fósforo, soma de bases (SB) e capacidade de troca de cátions (CTC). Quanto à matéria orgânica (MO) e ao potássio (K), embora tenha ocorrido redução inicial nos teores, possivelmente relacionada ao histórico anterior de uso pastoril e à alta mobilidade do potássio, verificou-se recuperação gradual desses atributos, acompanhada do aumento da CTC e da estabilização do pH.

De modo geral, a precipitação exerceu papel determinante na fertilidade de plantios de eucalipto neste estudo. Observou-se que nutrientes de maior mobilidade, como K^+ e Ca^{2+} , são diretamente influenciados pelo aumento da pluviosidade, ao passo que elementos de menor mobilidade, como o fósforo, não evidenciam um padrão consistente de resposta. Em áreas de baixa pluviosidade, a menor lixiviação favorece a estabilidade da SB, ao passo que em zonas intermediárias o aumento das chuvas intensifica a lixiviação, que, sem reposição suficiente, resulta em queda. Já em ambientes mais úmidos, a maior decomposição e a ciclagem de nutrientes, associadas à alta produtividade, possibilitam a recuperação relativa da SB ao longo dos ciclos.

Nos Latossolos distróficos argilosos, a argila e a intensa atividade biológica aceleram a decomposição da matéria orgânica, mas ao mesmo tempo favorecem a formação de complexos organominerais, responsáveis pelo aumento da CTC e pela maior retenção de bases. Já nos Argissolos eutróficos, a elevada saturação por bases, aliada ao manejo de cultivo mínimo, possibilitou a manutenção da fertilidade ao longo dos ciclos. Em contraste, nos Neossolos Flúvicos e Espodossolos hidromórficos, onde a proteção física e química da matéria orgânica é restrita, houve maior variabilidade na resposta e maior risco de lixiviação de nutrientes.

Portanto, manter o cultivo mínimo e a deposição de resíduos do descascamento em campo tem se mostrado uma prática eficaz para sustentar a fertilidade do solo. Entretanto, ajustes localizados por faixa pluviométrica e tipo de solo são uma estratégia viável para garantir maior eficiência de produção e resiliência do sistema ao longo dos ciclos.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, D. S. **Recuperação ambiental da Mata Atlântica: lições aprendidas e caminhos para o futuro**. São Paulo: Instituto Florestal; Instituto BioAtlântica, 2016. 230 p. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/8xvf4/pdf/almeida9788574554402.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2025.
- Amorim, V. S. S.; Monteiro, K. M. S.; Sousa, G. O.; Damascena, J. F.; Pereira, J. A.; Moraes, W. Dos S. Os benefícios ambientais do plantio de eucalipto: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e318101119604-e318101119604, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i11.19604>.
- Baldotto, M. A.; Vieira, E. M.; Souza, D. D. O.; Baldotto, L. E. B. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. **Revista Ceres**, v. 62, n. 1, p. 60–68, 2015. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201562010008>.
- Barros, N. F. De; Novais, R. F. De.; Teixeira, J. L.; Fernandes Filho, E. I. Nutricalc 2.0 - Sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Floresta**, Valdivia, v. 16, n. 1, p. 129-131, 1995. Disponível em: http://epa.niif.hu/04900/04996/00031/pdf/EPA04996_acta_2024_01.pdf#page=24. Acesso em abril de 2025.
- Barros, W. T.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Da Conceição Júnior, V.; Pereira, M. G.; Monroe, P. H. M.; Da Silva, M. S.; Nascimento, M. S.; Morais, J. L. Biomass production and nutritional efficiency in short rotation eucalypt clone plantations for energy in north-east Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 86, n. 2, p. 102-114, 2024. <https://doi.org/10.2989/20702620.2024.2325998>.
- Bentancor, L.; Hernández, J.; Del Pino, A.; Califra, A.; Resquín, F.; González-Barrios, P. Evaluation of the biomass production, energy yield and nutrient removal of *Eucalyptus dunnii* Maiden grown in short rotation coppice under two initial planting densities and harvest systems. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 122, p. 165-174, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.019>.
- Binkley, D.; Fisher, R. F. **Ecology and management of forest soils**. John Wiley & Sons. 5ª ed. Flagstaff, Arizona, Northern Arizona University, pp. 440. 2019.
- Braga, R. M.; De Assis Braga, F.; Venturin, N. Carbono orgânico no solo sob mata nativa e florestas plantadas em longo prazo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 42, 2022. <https://doi.org/10.4336/2022.pfb.42e202002121>.
- Brown, V.; Barbosa, F. T.; Bertol, I.; Mafra, Á. L.; Muzeka, L. M. Efeitos no solo e nas culturas após vinte anos de cultivo convencional e semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1, p. 5501, 2018. <https://doi.org/10.5039/agraria.v13i1a5501>.
- Cândido, B. M.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Batista, P. V. G. Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38, 5, 1565-1575, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000500022>.

Carvalho, D. C.; Pereira, M. G. G.; Toledo, L. O.; Simon, C. A.; Rodrigues, J. S.; Fernandes, J. C. F.; Neto, E. C. S. Ciclagem de nutrientes de um plantio de eucalipto em regeneração de espécies nativas no sub-bosque. **Revista Floresta**, v. 47, n. 1, p. 17–28, 2017. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v47i1.43652>.

CIB, Conselho de Informações sobre Biotecnologia. **Eucalipto: oportunidades para um desenvolvimento sustentável**. 20 p., junho, 2008.

Cook, R. L.; Binkley, D.; Stape, J. L. Eucalyptus plantation effects on soil carbon after 20 years and three rotations in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.12.011>.

Costa, M. G.; Andrade, D. S.; Sousa, R. O.; Oliveira, I. V.; Santos, J. G.; Trindade, A. V. Dinâmica da matéria orgânica e sua relação com a CTC em latossolos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, 2018. <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20170270>.

Cunha, F. F.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Batista, P. V. G.; Oliveira, E. C.; Lima, J. M. Influência da adubação ao rendimento de eucalipto em sistema de integração lavoura, pecuária e floresta. **Scientia Forestalis**, v. 51, e3994, 2023. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.39>.

Dick, G.; Schumacher, M. V.; Momolli, D. R.; Guimarães, C. D. C.; Souza, H. P. D.; Ludvichak, A. A. Micronutrientes e biomassa em povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 41, 2017. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000100013>.

Dieckow, J.; Bayer, C.; Martin-Neto, L.; Mielniczuk, J. Sistemas conservacionistas de preparo do solo e implicações no ciclo do carbono. **Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos**, Sv. 12, 2004. 17 p.

Donagemma, Guilherme Kangussu et al. Characterization, agricultural potential, and perspectives for the management of light soils in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016.

Duarte, M. L.; Ribeiro, A. Influência do El Niño e La Niña na produtividade de plantios de Eucalipto em distintas regiões no Brasil. **Ciência Florestal**, v. 33, p. e61334, 2023. <https://doi.org/10.5902/1980509861334>.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Argissolos Vermelho-Amarelos: características, uso e limitações. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-mata-sul-pernambucana/caracteristicas-do-territorio/recursos-naturais/solos/argissolos-vermelho-amarelos>. Acesso em agosto de 2025.

EMBRAPA. Sistemas para produção agropecuária: O solo – a base para a produção vegetal. [recurso eletrônico] Brasília, 2022. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1150999/1/EBOOK-Sistemas-para-producao-agropecuaria-19122022-15-60.pdf>. Acesso em agosto de 2025.

Foelkel, C. Minerais e nutrientes das árvores dos eucaliptos: Aspectos ambientais, fisiológicos, silviculturais e industriais acerca dos elementos inorgânicos presentes nas árvores. **Eucalyptus Newsletter**, v. 2, 2005.

Garlet, C. **Balço nutricional e sustentabilidade da produtividade de povoamentos de Eucalyptus dunnii Maiden em função do método de colheita da madeira**. 2021. 72 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, Santa Maria, RS, 2021.

Gatto, A.; A. Bussinguer, P.; Ribeiro, F. C.; Azevedo, G. B.; Bueno, M. C.; Monteiro, M. M.; Souza, P. F. Ciclagem e balanço de nutrientes no sistema solo-planta em um plantio de *Eucalyptus* sp., no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300019>.

Gentil, M. S. **Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de Eucalyptus aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia**. 2010. 71 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais – Área de Silvicultura e Manejo Florestal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001818139>. Acesso em maio de 2025.

Gobbi, K. F.; Takahashi, M.; Azevedo, M. C. B. D.; Fidalski, J.; Lugão, S. M. B. Cassava yield in conventional and no-tillage cultivation in integrated crop-livestock systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 57, p. e02677, 2022. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02677>.

Gomes, G. S. L.; Caldeira, M. V. W.; Gomes, R.; Duarte, V. B. R.; Momolli, D. R., Faria, J. C. T.; Schumacher, M. V. Biomass production and nutritional sustainability in different species of African Mahogany. **Forests**, v. 15, n. 11, p. 1951, 2024. <https://doi.org/10.3390/f15111951>

Gómez-Rey, M. X.; González-Prieto, S. J.; González-Vila, F. J.; Martínez, J. Dinâmica de C e N do solo dentro de um gradiente de precipitação em plantações de eucalipto no Mediterrâneo. **Plant and Soil**, v. 336, p. 157–171, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0456-5>.

Gonçalves, J. L. M.; Alvarez, V. H.; Rocha, J. H. T.; Silva, L. D.; Gama-Rodrigues, A. C.; Rodrigues, J. D.; Oliveira, M. A.; Silva, P. H. M. **Manejo de solos e nutrição de eucaliptos**. In: Gonçalves, J. L. M.; BENEDETTI, Valdir (Orgs.). Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF, p. 439–548, 2012.

Gruber, Y. B. G. **Otimização da lâmina de irrigação na produção de mudas clonais de eucalipto (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* var. *plathyphylla*)**. 2006. 141 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

Guedes, M.C. et al. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 649–656, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000400008>.

Guevara, M. Soil respiration signals in response to sustainable soil management practices enhance soil organic carbon stocks. **arXiv preprint**, arXiv:2404.05737, 2024.

<https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.05737>

Guo, H.; He, Q.; Meng, Q.; Min, Z.; Chen, P.; Li, Y.; Chen, J.; Wei, Q.; Zhou, Z.; Xu, J. The Aggregate Structure and Organic Carbon Mineralization in Forest Soils Along an Elevation Gradient in the Sygera Mountains of the Southeastern Tibetan Plateau. **Forests**, v. 16, n. 2, art. 298, 2025. <https://doi.org/10.3390/f16020298>

Guo, J.; Wang, B.; Wang, G.; Wu, Y.; Cao, F. Vertical and seasonal variations of soil carbon pools in ginkgo agroforestry systems in eastern China. **Catena**, v. 171, p. 450-459, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.032>

Han, X.; Wang, Y.; Zhang, Y.; Li, Y.; Chen, Y.; Liu, Y.; Zhang, J.; Wang, J.; Li, X.; Liu, H. As propriedades da matéria orgânica do solo controlam as atividades das enzimas microbianas e os fluxos de gases de efeito estufa ao longo de um gradiente de elevação. **Geoderma**, v. 438, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116916>.

He, X.; Zhang, W.; Zhang, X.; Fang, Y.; Wang, X.; Tang, Z.; Yuan, Z.; He, H.; Yu, G. Global patterns and drivers of soil total phosphorus concentration. **Earth System Science Data**, [S. l.], v. 13, p. 5831-5850, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5831-2021>

Hernández, J.; del Pino, A.; Hitta, M.; Lorenzo, M. Management of forest harvest residues affects soil nutrient availability during reforestation of *Eucalyptus grandis*. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 2016. <https://doi.org/10.5194/essd-13-5831-2021>

Hoogar, R.; Malakannavar, S.; Sujatha, H. T. Impact of eucalyptus plantations on ground water and soil ecosystem in dry regions. **J. Pharmacogn. Phytochem**, v. 8, n. 4, p. 2929-2933, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Sujatha-H-T/publication/335490998_Impact_of_eucalyptus_plantations_on_ground_water_and_soil_ecosystem_in_dry_regions/links/5d68f0f3a6fdccadeae45bf6/Impact-of-eucalyptus-plantations-on-ground-water-and-soil-ecosystem-in-dry-regions.pdf. Acesso em: 20 de julho de 2025.

Indústria Brasileira De Árvores – IBÁ. **Relatório anual, 2023**. Disponível em <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 20 de julho de 2025.

Inkotte, J.; Martins, R. C. C.; Scardua, F. P.; Pereira, R. S. Métodos de avaliação da ciclagem de nutrientes no bioma Cerrado: uma revisão sistemática. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 2, 2019. p. 988-1003. <https://doi.org/10.5902/1980509827982>

José, J. F. B.; Vargas, L. K.; Lisboa, B. B.; Vieira, F. C. B.; Zanatta, J. A.; Araujo, E. F.; Bayer, C. Soil Carbon Stock and Indices in Sandy Soil Affected by *Eucalyptus* Harvest Residue Management in the South of Brazil. **Soil Systems**, v. 7, n. 4, p. 93, 2023. <https://doi.org/10.3390/soilsystems7040093>

Khan, M. T.; Aleinikovienė, J.; Butkevičienė, L. M. Innovative organic fertilizers and cover crops: impacts on soil health and crop productivity. **Agronomy**, Basel, v. 14, n. 12,

p. 2871, 2024. <https://doi.org/10.3390/agronomy14122871>

Laclau, J. P.; Ranger, J.; Deleporte, P.; N'diaye, A.; Marlet, S.; Bouillet, J. P.; Moko, J.; Saint-André, L. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations: main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1771-1785, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010>.

Li, H.; Liu, G.; Luo, H.; Zhang, R. Labile carbon-induced soil organic matter turnover in a subtropical forest under different redox conditions. **Journal of Environmental Management**, v. 348, p. 119387, 2023.

Lima Araújo, S. De; Melo, A. B.; Oliveira, L. De J.; Costa, L. De M. Cor, grã e propriedades físico-mecânicas da madeira de *Corymbia* e *Eucalyptus* não tradicionais. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 51, e4029, 2023. <https://doi.org/10.18671/scifor.v51.40>

Lima, S. S.; Leite, L. F. C.; Aquino, A. M.; Oliveira, F. Das C.; Castro, A. A. J. F. Serapilheira e teores de nutrientes em argissolo sob diferentes manejos no norte do Piauí. **Revista Árvore**, v. 34, p. 75-84, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000100009>

Mendham, D. S.; White, D. A.; Battaglia, M.; McGrath, J. F.; Short, T. M.; Ogden, G. N.; Kinal, J. Soil water depletion and replenishment during first-and early second-rotation *Eucalyptus globulus* plantations with deep soil profiles. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 151, n. 12, p. 1568-1579, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.014>

Mendonça, V. Z. D.; Mello, L. M. M. D.; Andreotti, M.; Pereira, F. C. B. L.; Lima, R. C.; Valério Filho, W. V.; Yano, É. H. Avaliação dos atributos físicos do solo em consórcio de forrageiras e milho em sucessão com soja em região de cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 251-259, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100026>

Monteiro, M. T.; Gama-Rodrigues, E. F. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 819-826, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000500004>

Oliveira, A. M. D.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Novaes, A. B. D.; Carvalho, F. F. D.; Meireles, I. E. D. S. Decomposição da serapilheira foliar em plantios de bambu, nim indiano e eucalipto. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 845-855, 2020. <https://doi.org/10.5902/1980509838190>.

Oliveira, E. B.; Pinto Junior, J. E. **O eucalipto e a Embrapa: quatro décadas de pesquisa e desenvolvimento**. Brasília, D.F: Embrapa, 2021.

Paes, F. A. S. V., Lima, A. M. N.; Hakamada, R. E.; Barros, N. F. D. Impacto do manejo dos resíduos da colheita, do preparo do solo e da adubação na produtividade de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1081-1090, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400025>

Parron, L. M.; Garcia, J. R.; De Oliveira, E. B.; Brown, G. G.; Prado, R. B. Serviços

ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. **Embrapa Florestas-Livro científico (ALICE)**, 2015.

Pedreira, M. S. **O complexo florestal e o Extremo Sul da Bahia: inserção competitiva e transformações socioeconômicas na região**. 2008. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Territorial e Políticas Públicas) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Ciências Humanas e Sociais, Seropédica, 2008. Disponível em: <https://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/9543>. Acesso em: 30 abr. 2025.

Peng, Y.; Schmidt, I. K.; Zheng, H.; Heděnc, P.; Bachega, L. R.; Yue, K.; Wu, F.; Vesterdal, L. Tree species effects on topsoil carbon stock and concentration are mediated by tree species type, mycorrhizal association, and N-fixing ability at the global scale. **Forest Ecology and Management**, v. 478, p. 118510, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118510>

Pimentel, J. P.; Henry, C. G.; Brye, K. R.; Runkle, B. R. K. PIMENTEL, Jeferson P. et al. Conservation management effects on soil and agronomic properties in a furrow-irrigated corn system in east-central Arkansas. **Agronomy Journal**, v. 117, n. 4, p. e70108, 2025. <https://doi.org/10.1002/agj2.70108>

Ramella, J. R. P.; Barbosa, J. D. A.; Ferreira, S. D.; Fey, E.; Costa, N. V. Weed interference on nutrient accumulation in the leaves of cassava under no-tillage or conventional tillage. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01750, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2020.v55.01750>

Ribeiro, C. A. D. **Delimitação de zonas agroclimáticas para cultura do eucalipto no norte do Espírito Santo e sul da Bahia**. 2009. 102f. Dissertação 56 (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias, Alegre, 2009.

Rocha, J. H. T.; Silva, M. A.; Costa, L. M.; Souza, A. P.; Lima, R. S.; Almeida, A. C. Dinâmica de crescimento e produtividade de uma plantação de *Eucalyptus grandis* sob omissão de N, P, K, Ca e Mg em duas rotações de culturas. **Forest Ecology and Management**, v. 444, p. 1–12, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.060>

Rodrigues, C. B.; Silva, M. L. N.; Curi, N.; Oliveira, E. C.; Lima, J. M. Efeitos do manejo de curta rotação do eucalipto sobre nutrientes e sedimentos em riachos subtropicais. **Forests**, v. 10, n. 6, p. 519, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10060519>

Ronquim, C. C. **Geovale: análise da distribuição geoespacial e aspectos ambientais da eucaliptocultura na bacia do Rio Paraíba do Sul**. 2016.

Salomão, P. E. A.; Kriebel, W.; Santos, A. A.; Martins, A. C. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 1, p. e154911870-e154911870, 2020. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i1.1870>

Sandoval López, D. M.; Arturi, M. F.; Goya, J. F.; Pérez, C. A.; Frangi, J. L. *Eucalyptus grandis* plantations: effects of management on soil carbon, nutrient contents and yields. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 2, p. 601-611, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0850-z>

Santana, E. J.; Santos, F. R.; Mastelini, S. M.; Melquiades, F. L.; Barbon Junior, S. Improved prediction of soil properties with Multi-target Stacked Generalisation on EDXRF spectra. **arXiv preprint**, arXiv:2002.04312, 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.04312>

Santos, D. B. S.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Monroe, P. H. M.; de Paula, R. D. C. A. L.; de Carvalho, F. F. Microenvironment Effects on Decomposition and Mesofauna of Eucalypt Leaf Litter: A Case Study of High-Altitude Tropical Climate, Brazil. **Environmental Quality Management**, 2024. <https://doi.org/10.1002/tqem.22314>

Santos, H. G. dos et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2023. ISBN: 978-65-89957-32-5. Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/sibcs>. Acesso em: 28 jul. 2025.

Schmidt, M. W. I.; Torn, M. S.; Abiven, S.; Dittmar, T.; Guggenberger, G.; Janssens, I. A.; Klever, M.; Kogel-knabner, I.; Lehman, J.; Manning, D. A. C.; Nannipieri, P.; Rasse, D. P.; Weiner, S.; Trumbore, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 49-56, 2011. <https://doi.org/10.1038/nature10386>

Silva, C. A. **Manejo de pastagens e seu efeito sobre o estoque de carbono do solo no bioma Cerrado**. 2019. 92 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstreams/9795c912-4e43-4685-a248-248a39047567/download>. Acesso em: 01 ago. 2025

Silva, R. F. D.; Guimarães, M. D. F.; Aquino, A. M. D.; Mercante, F. M. Análise conjunta de atributos físicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, n. 10, p. 1277-1283, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000023>

Simões, L. H.; Peña-Claros, M.; Guillemot, J.; Brouwer, R.; Bongers, F.; Poorter, L.; Brancalion, P. H. Recovery of tree species functional composition in eucalypt plantations with natural regeneration differs among canopy strata. **Forest Ecology and Management**, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2025.122952>

Souza, C. L.; Schettino, S.; Silva, D. D.; Guimarães, N. V. Balanço de Carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no Norte de Minas Gerais. **Caderno de Ciências Agrárias**, 2019. <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2019.15160>

Spangenberg, A.; Grimm, U.; Silva, J. R. S. da; Fölster, H. Nutrient store and export rates of *Eucalyptus urograndis* plantations in eastern Amazonia (Jari). **Forest Ecology and Management**, v. 80, n. 1–3, p. 225–234, 1996. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03615-6](https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03615-6)

Stevenson, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. John Wiley & Sons, 1994.

Sun, F., Fan, L.; Deng, G.; Kuzyakov, Y.; Zhang, Y.; Wang, J.; Peng, C. Responses of tropical forest soil organic matter pools to shifts in precipitation patterns. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 197, p. 109530, 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109530>

Tan, Y.; Li, X.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Li, X.; Zhang, Y. Características hidrológicas do solo entre tipos de floresta, idade do povoamento e rotação sucessiva em plantações de eucalipto no sul da China. **Forests**, v. 15, n. 3, p. 423, 2024.

<https://doi.org/10.3390/f15030423>

Tavares, V. C.; Arruda, Í. R. P.; Silva, D. G. Desertificação, mudanças climáticas e secas no semiárido brasileiro: uma revisão bibliográfica. **Geosul**, v. 34, n. 70, p. 385-405, 2019.

<https://doi.org/10.5007/2177-5230.2019v34n70p385>.

Vargas, G. R. de; Bianchin, J. E.; Blum, H.; Wagner, W. Dinâmica da acumulação de fitomassa e nutrientes na serapilheira sob plantios clonais de eucalipto. **Nativa**, Sinop, v. 7, n. 1, p. 84–93, 2019. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i1.6767>

Veracel Celulose S.A. **Plano de manejo florestal: 2022–2023**. Eunápolis: Veracel Celulose, 2023. Disponível em: <https://www.veracel.com.br/wp-content/uploads/2024/07/Plano-de-Manejo-Florestal-Veracel-Celulose-2022-2023.pdf>. Acesso em: 2 maio 2025.

Viana, M. B. **O eucalipto e os efeitos ambientais do seu plantio em escala**. Brasília, DF: Câmara dos Deputados, Centro de Documentação e Informação, Coordenação de Biblioteca, 2004. Disponível em:

<https://www2.camara.leg.br/biblioteca/publicacoes/estudos-e-notas-tecnicas/estudos-tematicos/o-eucalipto-e-os-efeitos-ambientais-do-seu-plantio-em-escala>. Acesso em maio de 2025.

Vital, M. H. F. Impacto ambiental de florestas de eucalipto. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 28, p. 235–275, 2007. Disponível em:

<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/12554>. Acesso em maio de 2025.

Walkley, A.; Black, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, v. 37, n. 1, p. 29–38, 1934. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>

Xavier, F. A. S.; Maia, S. M. F.; Ribeiro, K. A.; Mendonça, E. S.; Oliveira, T. S. Effect of cover plants on soil C and N dynamics in different soil management systems in dwarf cashew culture. **Agriculture, Ecosystems e Environment**, v. 165, p. 73–183, 2013.

<https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2012.12.003>

Xu, Y.; Li, Y.; Zhang, Y.; Wang, Y.; Zhou, W.; Zhang, X. Efeitos de diferentes períodos de rotação de plantações de eucalipto nas propriedades físico-químicas do solo, atividades enzimáticas, biomassa microbiana e comunidade microbiana. **Forest Ecology and Management**, v. 463, p. 117–130, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118038>

Yang, Y.; Zhang, Y.; Guo, X.; Zhou, B.; Zheng, H. Influence of precipitation change on soil nutrients in plantation ecosystems: A meta-analysis. **Forests**, v. 10, n. 6, p. 519, 2019. <https://doi.org/10.3390/f10060519>

Zanchi, G.; Freer-Smith, P.; Cundall, E.; Crowe, A.; Dorrington, R.; Gibson, L.; Hemery, G.; Hirst, J.; Hopkins, J.; Pulford, I. D.; Reynolds, B.; Sansum, P.; Smith, S.; Tipping, E.; Veltman, C. J. Modeling the effects of forest management intensification on soil base cations and nutrient cycling. **European Journal of Forest Research**, v. 140, p. 1403-1418, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01408-6>.

Zhang, H.; Tang, J.; Liang, S.; Li, Z.; Wang, J.; Wang, S. Early thawing after snow removal and no straw mulching accelerates organic carbon cycling in a paddy soil in Northeast China. **Journal of environmental management**, v. 209, p. 336-345, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.069>.

Zhou, X., Zhu, H.; Wen, Y.; Goodale, U. M.; Zhu, Y.; Yu, S.; Li, X. Intensive management and declines in soil nutrients lead to serious exotic plant invasion in Eucalyptus plantations under successive short-rotation regimes. **Land Degradation & Development**, v. 31, n. 3, p. 297-310, 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3449>.