E-ISSN 1981-9021
EDIÇÃO 47
2025

ESTOQUE DE CARBONO NOS SOLOS NA ZONA DE TRANSIÇÃO FLORESTA ALTOMONTANA - CAMPOS DE ALTITUDE NA SERRA DA MANTIQUEIRA - ITAMONTE (MG)

SOIL CARBON STOCK IN THE HIGH-MOUNTAIN FOREST TRANSITION ZONE – HIGH-ALTITUDE GRASSLANDS OF THE SERRA DA MANTIQUEIRA – ITAMONTE (MG)

STOCK DE CARBONO EN LOS SUELOS DE LA ZONA DE TRANSICIÓN DE BOSQUE DE ALTA MONTAÑA – CAMPOS DE ALTITUD DE LA SERRA DA MANTIQUEIRA – ITAMONTE (MG)

AUTOR
Antonio Soares da Silva
Mariana Mascarenhas Fernandes
Vanessa Ingrid Carvalho Saraiva

FILIAÇÃO INSTITUCIONAL
UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO (UERJ)

E-MAIL
antoniossoares@gmail.com
marianamascarenhasf@gmail.com
vanessaicsaraiva@hotmail.com

DATA DE SUBMISSÃO: 25/ 02/25
DATA DE APROVAÇÃO: 25/ 06/25

DOI: 10.12957/GEOUERJ.2025.90182

BY-NC-SA

E-ISSN 1981-9021

ESTE É UM ARTIGO DE ACESSO ABERTO DISTRIBUÍDO SOB OS TERMOS DA LICENÇA CREATIVECOMMONS BY-NC-SA 4.0, QUE PERMITE USO, DISTRIBUIÇÃO E REPRODUÇÃO PARA FINS NÃO COMERCIAIS, COM A CITAÇÃO DOS AUTORES E DA FONTE ORIGINAL E SOB A MESMA LICENÇA.

// RESUMO

A preocupação com as emissões de carbono relacionadas às mudanças nos solos impulsiona estudos sobre o tema, especialmente nos trópicos, responsáveis por 12% a 20% das emissões globais de carbono para a atmosfera. Este estudo quantificou a matéria orgânica do solo e estimou o estoque de carbono (EC) na Fazenda do Pinhão Assado, uma área de Mata Atlântica em Minas Gerais, Brasil. Foram coletadas 21 amostras em agosto de 2023, em altitudes entre 1.400 e 2.400 metros. A densidade do solo (DS) variou de 0,41 g cm^{-3} a 0,99 g cm^{-3}, enquanto os maiores estoques de carbono foram registrados nos pontos 07, 08 e 15, com 1.729, 1.402 e 1.328 Mg C ha^{-1}, respectivamente. O EC médio foi de 673 Mg C ha^{-1}, estimando-se um total de 686.042 Mg C armazenados nos solos da fazenda. Observou-se correlação entre altitude e maior concentração de carbono orgânico e matéria orgânica nos horizontes A, destacando o papel das condições ambientais no acúmulo de carbono em solos tropicais. Esses resultados reforçam a importância da conservação de solos como estratégia para mitigação das emissões de carbono.

Palavras-chave: Mata Atlântica, matéria orgânica, área de preservação, densidade dos solos, solos em floresta.

REVISTA GEO UERJ

E-ISSN 1981-9021
EDIÇÃO 47
2025

// ABSTRACT

The concern over carbon emissions associated with soil changes has driven studies on this subject, especially in tropical regions, which account for 12% to 20% of global organic carbon emissions to the atmosphere. This study has quantified soil organic matter and estimated the carbon stock (CS) in “Fazenda do Pinhão Assado”, an Atlantic Forest area in Minas Gerais, Brazil. Twenty-one soil samples were collected in August 2023 at altitudes ranging from 1,400 to 2,400 meters. Soil bulk density (BD) ranged from 0.41 g cm^{-3} to 0.99 g cm^{-3}, while the highest carbon stocks were recorded at points 07, 08, and 15, with 1,729, 1,402, and 1,328 Mg C ha^{-1}, respectively. The average CS was 673 Mg C ha^{-1}, with an estimated total of 686,042 Mg C stored in the farm’s soils. A correlation was observed between altitude and higher concentrations of organic carbon and organic matter in the A horizons, highlight the role of environmental conditions in carbon accumulation in tropical soils. These findings emphasizing the importance of soil conservation as a strategy for mitigating carbon emissions.

Keywords: tropical soils, organic matter, conservation area, soil density, forest soils.

// RESUMEN

La preocupación por las emisiones de carbono asociadas a los cambios en los suelos ha impulsado numerosos estudios sobre este tema, particularmente en regiones tropicales, responsables del 12% al 20% de las emisiones globales de carbono orgánico. Este estudio cuantificó la materia orgánica del suelo y estimó el almacenamiento de carbono (CS) en la Fazenda do Pinhão Assado, un área de Mata Atlántica ubicada en Minas Gerais, Brasil. Se recolectaron 21 muestras de suelo en agosto de 2023, en altitudes que varían entre 1.400 y 2.400 metros. La densidad aparente del suelo (BD) osciló entre 0,41 g cm^{-3} y 0,99 g cm^{-3}, mientras que los mayores almacenamientos de carbono se registraron en los puntos 07, 08 y 15, con 1.729, 1.402 y 1.328 Mg C ha^{-1}, respectivamente. El promedio de CS fue de 673 Mg C ha^{-1}, con un total estimado de 686.042 Mg C almacenados en los suelos de la finca. Se observó una correlación entre la altitud y mayores concentraciones de carbono orgánico y materia orgánica en los horizontes A, destacando el papel de las condiciones ambientales en la acumulación de carbono en suelos tropicales. Estos resultados subrayan la importancia de la conservación de los suelos como estrategia para mitigar las emisiones de carbono.

Palabra Clave: suelos tropicales, materia orgánica, área de conservación, densidad del suelo, suelos forestales.

INTRODUÇÃO

Os impactos das atividades humanas sobre o ecossistema terrestre estão se tornando cada vez mais evidentes. Dentro desse contexto, os solos emergem como um elemento central nas análises e na discussão na mitigação do aumento de emissões de carbono atmosférico, pois representam o maior reservatório terrestre de carbono (LAL, 2004; FIDALGO et al., 2007; LEPSCH, 2011). As mudanças de uso e ocupação das terras nos trópicos são responsáveis por 12 a 20% da emissão de carbono orgânico, especialmente devido à conversão de áreas florestadas em sistemas agropastoris, que de forma contínua somam taxas de 13 milhões de hectares de áreas desflorestadas (DON et al., 2011).

A manutenção dos solos, sobretudo os de maior teor de matéria orgânica, desempenha um papel significativo na provisão de serviços ecossistêmicos, associados, não somente a sua capacidade de uso agrícola, mas ao armazenamento de carbono orgânico (CALONEGO et al., 2011; PARRON et al., 2015; CARVALHO et al., 2023). O teor de matéria orgânica em áreas florestadas apresenta, em geral, um quantitativo mais elevado, quando comparada com áreas desflorestadas (MORGAN, 2005). Assim a preservação de ecossistemas florestais não só se relaciona com a conservação da biodiversidade, mas também influencia na manutenção do estoque de carbono no solo, impedindo sua emissão na atmosfera. A estimativa para os solos tropicais de emissão de carbono orgânico é de 0,2GtC yr-1 (Gigatonelada por ano) devido principalmente às mudanças de uso do solo, podendo-se falar que a mudança de uso e ocupação das terras têm uma contribuição de 10 a 30% do total de carbono orgânico emitido para a atmosfera (DON et al., 2011).

A vegetação é a principal contribuinte na adição de acúmulo de carbono no solo, principalmente por meio da deposição de serapilheira (composta por raízes, folhas e matéria orgânica mortas) e pela liberação de elementos e substâncias pela rizosfera (CARVALHO et al., 2023). Grande parte da matéria orgânica proveniente da biomassa acima do solo é retida nas camadas superficiais do solo, onde é rapidamente decomposta ou transportada para horizontes mais profundos (LIEBMANN et al., 2020).

A Mata Atlântica é um dos biomas de maior importância do mundo, por apresentar uma grande biodiversidade, originalmente recobria cerca de 15% do território nacional seguindo, ao longo da costa, do Rio Grande do Norte ao Rio Grande do Sul. Com o passar dos anos teve uma redução de cerca de 90% segundo dados do Atlas da Mata Atlântica (2020). Atualmente, é considerado um dos biomas mais ameaçados do mundo devido à urbanização desenfreada, expansão agrícola, exploração madeireira ilegal e outros impactos humanos (AZEVEDO, 2018).

Dada a sua relevância ecológica e socioeconômica, a preservação da Mata Atlântica tornou-se uma prioridade ambiental. Esforços para a conservação incluem a implementação de políticas públicas específicas, como a Lei da Mata Atlântica (Lei nº 11.428/2006), que estabelece diretrizes para a proteção, recuperação e uso sustentável do bioma (FERRAZ et al., 2019, SANTOS et al., 2024).

Essa legislação busca equilibrar a preservação ambiental com o desenvolvimento sustentável, promovendo práticas que minimizem impactos negativos e incentivem a recuperação de áreas degradadas.

A preservação das florestas e, especificamente, da Mata Atlântica está diretamente ligada à manutenção da matéria orgânica no solo, um fator essencial para a saúde dos ecossistemas e a mitigação das mudanças climáticas. Compreender a dinâmica do carbono no solo é crucial para identificar os mecanismos que promovem seu armazenamento de forma eficiente e sustentável. O carbono orgânico do solo se acumula principalmente durante o processo de decomposição da matéria orgânica, onde estes elementos passam pela mineralização (LEPSCH, 2011) e boa parte do carbono é convertida em gás carbônico.

A interação entre políticas e os estudos relacionados ao ciclo do carbono se tornam importantes diante do cenário ambiental de mudanças climáticas. O arcabouço legal vinculado ao carbono, geralmente, é associado a conjuntos de regulamentações ou princípios de cunho mundial ou escalas mais locais. A partir de um olhar mais amplo e em ordem cronológica, o primeiro acordo internacional que estabeleceu metas obrigatórias de redução de emissões de gases de efeito estufa para os países

desenvolvidos foi o Protocolo de Quioto em 1997. Sendo o mais recente representado pelo Acordo de Paris, em 2015, adotado em quase todos os países para combater as mudanças climáticas.

Ainda que se saiba que o solo é o maior sumidouro de carbono, o tema recebe pouca atenção nos meios políticos. No Brasil, isso pode estar relacionado ao fato do país estar localizado predominantemente na zona intertropical, onde as temperaturas médias mais elevadas aceleram a decomposição da matéria orgânica, o que reduz a concentração de carbono nos solos tropicais.

Apesar da maior velocidade de mineralização da matéria orgânica, é importante criar condições para o aumento do teor de carbono nos solos tropicais e de estabilização da matéria orgânica, que ocorre principalmente por meio de processos de adsorção em argilominerais (KEBLER et al., 2005). Os solos com alto teor de argilominerais, especialmente quando apresentam alta atividade, têm o potencial de acumular uma maior quantidade de matéria orgânica estabilizada.

A manutenção dos agregados do solo desempenha um papel fundamental nessa dinâmica, uma vez que macro e micro agregados podem proteger fisicamente a Matéria Orgânica do Solo (MOS) (CARVALHO et al., 2023). Nesse sentido, o tipo de uso do solo é um importante fator, pois a remoção da vegetação original altera todo o aporte e dinâmica da MOS.

As alterações no estoque de carbono são influenciadas pela quantidade e qualidade da matéria orgânica que entra no solo, juntamente com a taxa de decomposição. Esses fatores são determinados pela interação entre o clima, os atributos do solo e o uso e manejo das terras, levando-se em conta o histórico de utilização.

Segundo Fidalgo et al. (2007), as estimativas do estoque de carbono nos solos do Brasil em nível nacional são escassas. Para compor estimativas são necessárias informações acerca do teor de carbono orgânico (ou matéria orgânica), profundidade solos e dados de densidade do solo. A falta de informações disponíveis sobre a quantidade de carbono orgânico nos solos sob diferentes usos e em diversas regiões do país, dificulta o cálculo para os solos brasileiros. Azevedo (2018) destaca que os estudos dedicados ao levantamento do estoque de carbono desempenham um papel fundamental nas questões ambientais que envolvem o ciclo do carbono e o entendimento real das potencialidades dos solos nos diferentes biomas brasileiros.

Algumas iniciativas internacionais têm sido realizadas a fim de entender a efetiva capacidade de preservação da matéria orgânica em solos e seus ciclos.

Nos Estados Unidos da América (EUA) um estudo de Hilson et al. (2017) calculou as médias de carbono orgânico do solo (COS) em áreas pantanosas norte-americanas identificando um total de 0,071 g cm-3 nos primeiros 0 a 15 cm do solo.

No estudo de Burghardt et al. (2018) foram feitas estimativas do estoque de carbono no solo em áreas agricultáveis na zona de Ruhr na Alemanha. Os valores oscilaram entre 90 e 112 ton ha-1 até 30 cm, e 112 a 138 ton ha-1 até 100 cm de profundidade.

Como pode ser observado a concentração e o estoque de carbono no solo apresentam grandes variações. Bispo et al. (2017) debate a necessidade de parâmetros para estabelecer a quantidade de carbono orgânico em um solo, a partir de uma média mundial onde se possa traçar políticas públicas, dada a importância do solo no ciclo de carbono.

Um estudo envolvendo áreas de plantações e florestas temperadas mostrou que o tipo de argila é fundamental ao se entender a capacidade do solo de acumular matéria orgânica (DE ROSA et al., 2023), mostrando a importância da goethita quando comparada a ilita no acúmulo de carbono do solo.

No Brasil, diversos esforços têm se iniciado na tentativa de se estabelecer parâmetros e dados quantitativos acerca do estoque de carbono dos solos brasileiros. Fidalgo et al. (2007) utilizaram o banco de dados de solos da Embrapa para estimar o total de carbono estocado nos solos brasileiros, os autores chegaram à conclusão de que possivelmente há 36,6 Pg de carbono estocado nos solos brasileiros em média.

Considerando a diversidade de solos e ambientes no Brasil, o objetivo da presente pesquisa foi quantificar a matéria orgânica e o estoque de carbono no solo em setor florestado de Mata Atlântica, nas Terras Altas da Serra da Mantiqueira entre os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais (Brasil).

ÁREA DE ESTUDO

A Serra da Mantiqueira é dividida em duas regiões geomorfológicas: Serra da Mantiqueira Meridional e Serra da Mantiqueira Setentrional (MARQUES NETO, 2018). A porção Setentrional abarca desde o Sul de Minas Gerais até a divisa com o Espírito Santo, incluindo o Rio de Janeiro. Por sua vez, a região Meridional situa-se entre Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (Figura 1). Na Serra da Mantiqueira Meridional, destacam-se dois maciços alcalinos: o de Passa Quatro e o de Itatiaia.

Figura 1. Localização da área de estudo.

Fonte: Autores (2024)

A formação desses maciços remonta a movimentos de reativação brasiliana com a elevação de dois horsts: da Serra da Mantiqueira e da Serra do Mar, juntamente com a depressão do Rio Paraíba do Sul. Tais maciços alcalinos compõem-se de intrusões ígneas do Mesozoico, compostas por rochas neocretáceas encontradas nos corpos intrusivos de nefelina-sienitos. Esses elementos combinados resultam em relevos íngremes, caracterizados por vales profundos e vertentes dissecadas, delineando a paisagem da região Meridional da Mantiqueira (CHIESSI, 2004; MARQUES NETO, 2017; 2018).

As condições climáticas da região são de climas mesotérmicos com temperaturas abaixo da média para a tropicalidade brasileira. Em geral, nas zonas rebaixadas da serra, a temperatura média anual pode variar entre 18°C e 22°C, enquanto nas áreas mais elevadas, como o Pico das Agulhas Negras, as temperaturas médias anuais podem ser mais baixas, ficando entre 10°C e 15°C (ARTHUR e PÊGAS, 2013).

Em Itamonte, o clima é classificado como Cwb, conforme a classificação de Köppen, caracterizado por verões brandos com pluviosidade bem distribuída e invernos chuvosos, com uma média anual de temperatura variando entre 10°C até 20°C. A precipitação varia de 1.500mm a 2.000mm anuais.

O município de Itamonte se destaca com um índice elevado de cobertura do bioma Mata Atlântica em comparação com outros municípios do estado, totalizando 60% de cobertura vegetal (AMBIENTAL CONSULTING E MARIMAR, 2024).

Esta vegetação representa um complexo ecossistema caracterizado pela presença de espécies nativas como as araucárias, orquídeas e uma variedade de espécies arbóreas, incluindo ipês, gameleiras e guatambus (ARTHUR e PÊGAS, 2013; AMBIENTAL CONSULTING E MARIMAR, 2024). A singularidade deste ambiente é acentuada pela presença ocasional das "florestas nebulares", ecossistemas raros e frágeis, nos quais há interação entre as nuvens e a vegetação.

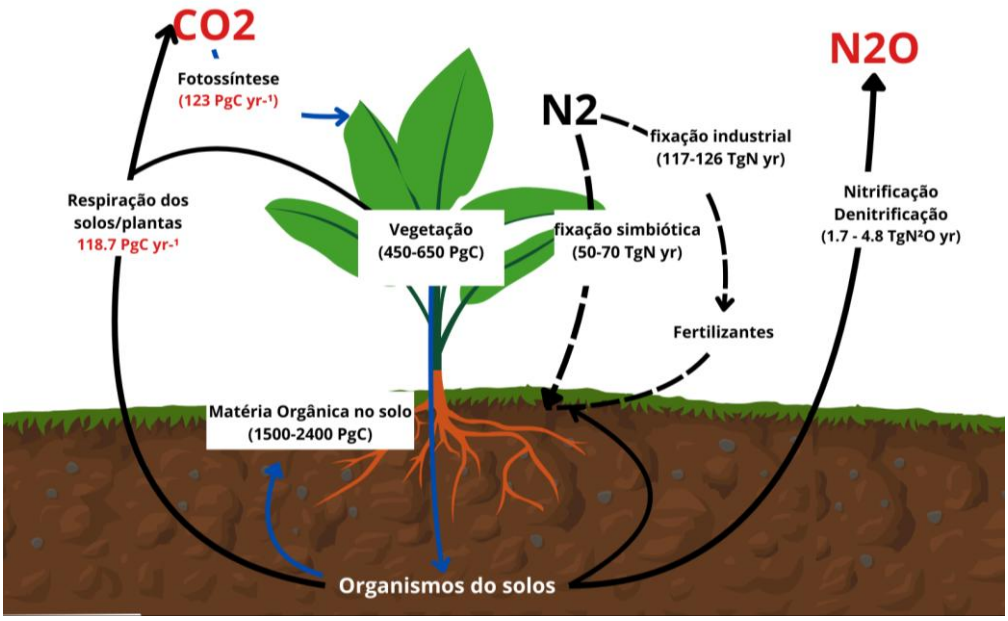
A área de estudo está inserida na Fazenda Pinhão Assado, que possui área total de 1.019,838 ha. Parte das terras da fazenda constitui a Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Alto Montana. Cerca de 90% da área da RPPN é composta pelo bioma Mata Atlântica, formada, no local, predominantemente por uma Floresta Ombrófila Densa Alto Montana e Campos de Altitude (ARTHUR e PÊGAS, 2013).

Em geral, a declividade é acentuada. Dentro da fazenda, as cotas altimétricas variam entre 1.400 e 2.400 metros. A RPPN Alto Montana protege 17 nascentes, somadas a outras 4 situadas além de seus limites. Cabe destacar que a RPPN também contribui para a proteção da microbacia do Pinhão Assado, que é formada pelos rios Pinhão Assado e Bomba Seca, contribuintes da Sub-bacia do Rio Capivari, pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio Verde.

METODOLOGIA

A síntese da circulação do carbono nos solos envolve entradas e saídas a partir da interação solo – planta – atmosfera (Figura 2). Além destas interações, destaca-se a participação da microbiota do solo e seus efeitos na dinâmica do carbono, incluindo a estabilização da matéria orgânica (CARVALHO et al., 2023).

Figura 2. Esquema do ciclo do carbono destacando as diversas rotas do elemento, que é absorvido pelos vegetais, durante a fotossíntese, retornando para a atmosfera através da respiração das próprias plantas e do metabolismo dos microrganismos.

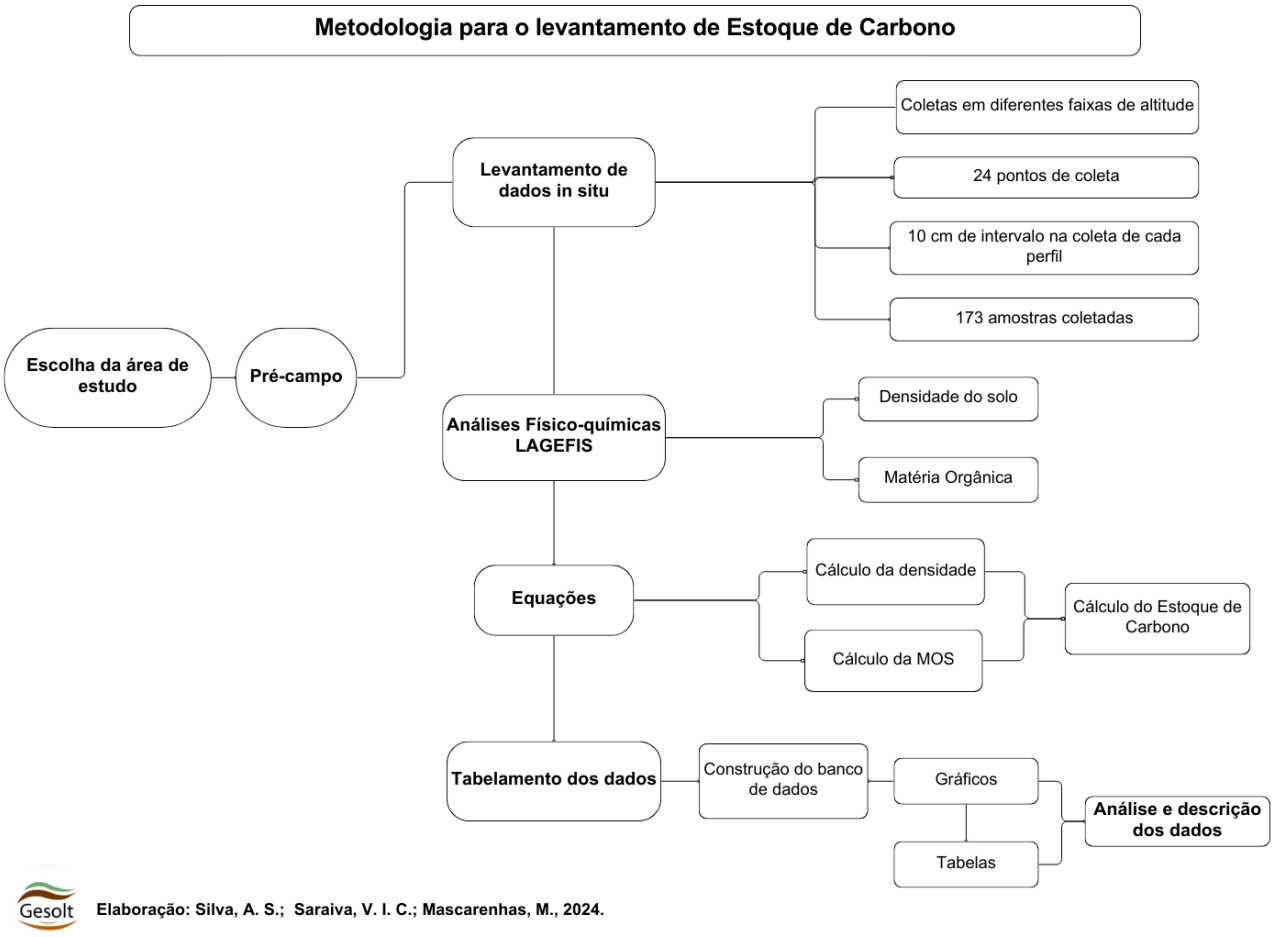


Fonte: Autores, 2024.

O sequestro de carbono no solo pode vir a ser uma das estratégias-chave para combater o efeito estufa. Estudos demonstraram que o reflorestamento em fragmentos de Mata Atlântica resultou em um aumento gradual da biomassa aérea e do estoque de carbono com o tempo de crescimento das florestas restauradas. Contudo, é nos fragmentos preservados da floresta nativa que se observa a maior concentração de estoque de carbono no solo (AZEVEDO et al., 2017).

As etapas metodológicas deste estudo são descritas a seguir, detalhando os procedimentos adotados para se alcançar os objetivos propostos. O fluxograma apresentado na Figura 3 sintetiza a abordagem metodológica, evidenciando os passos seguidos e sua inter-relação. Considerando a importância da preservação dos ecossistemas florestais e os impactos da ocupação humana sobre a Mata Atlântica, a metodologia foi estruturada de forma a garantir uma análise robusta e coerente com as particularidades do bioma.

Figura 3. Fluxograma das etapas metodológicas.



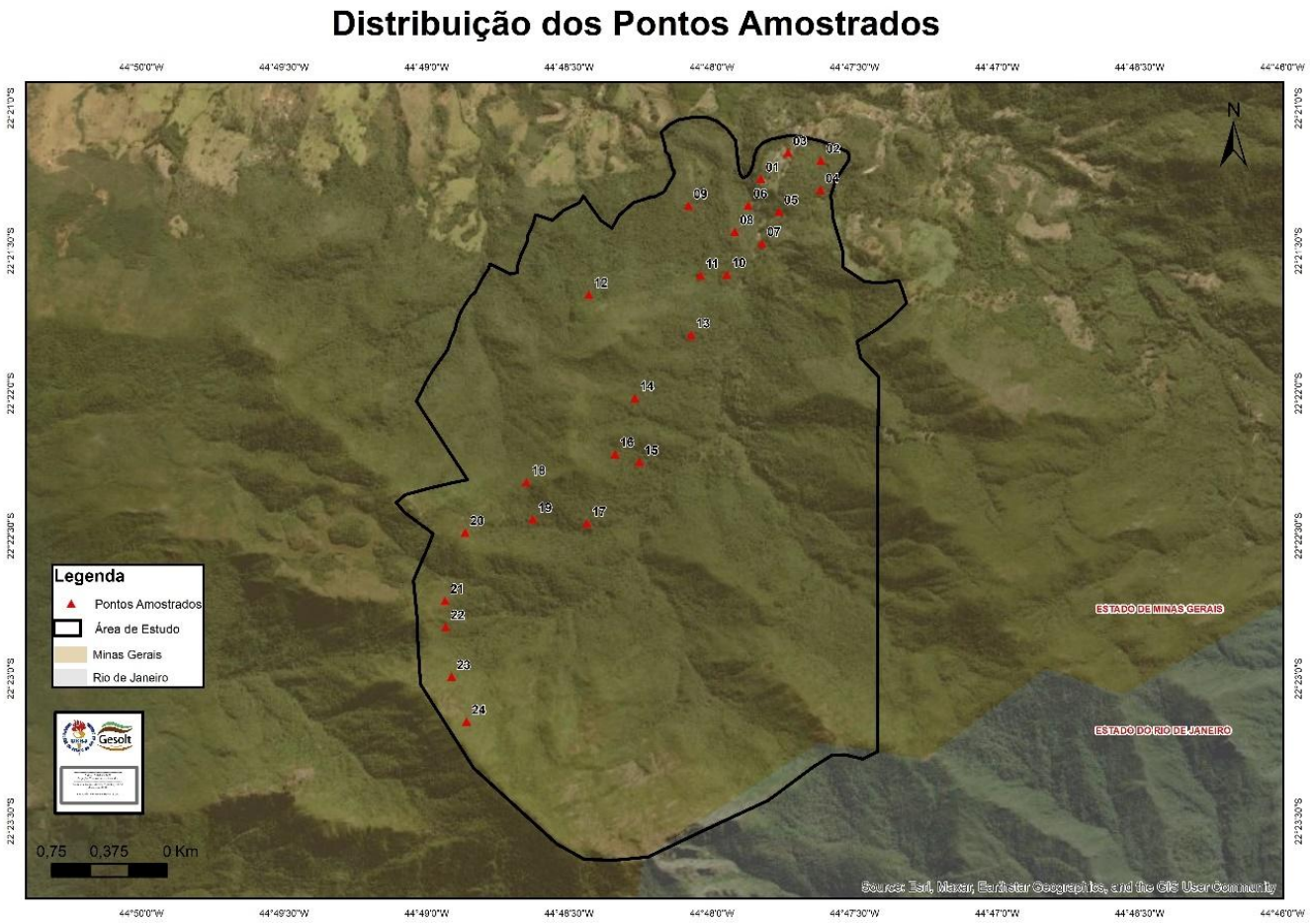
Fonte: Autores, 2024.

As coletas de amostras de solo ocorreram em agosto de 2023. Conforme mencionado anteriormente, o desnivelamento altimétrico na área de estudos é de 1.000 metros (de 1.400 a 2.400 m). Sempre que possível, as amostras foram coletadas a cada intervalo de 100 metros para detectar possíveis variações atitudinais no teor de carbono orgânico. A distribuição dos pontos de amostragem está apresentada na Figura 4.

Somente foram coletadas amostras dos horizontes A, desprezando-se a serrapilheira por não se constituir em carbono orgânico estocado no solo. As amostras dos horizontes A foram coletadas com intervalo de 10 centímetros de profundidade.

Foram amostrados 21 pontos, perfazendo 128 amostras deformadas e 21 amostras indeformadas. Em laboratório, as amostras foram secas ao ar por uma semana. Após este período, foram destorroadas e passadas em peneira de malha de 2mm, correspondente a fração Terra Fina Seca ao Ar (TFSA).

Figura 4. Mapa de distribuição dos pontos de amostragem na Fazenda Pinhão Assado.



Fonte: Autores, 2024.

Todas as amostras foram processadas no Laboratório de Geografia Física – LAGEFIS – UERJ. Para a determinação da Densidade do Solo (DS), foram coletadas amostras em cilindros com volume conhecido de 100 cm3, a DS foi calculada a partir da equação de Teixeira et al. (2017).

A determinação da matéria orgânica (MO) se deu a partir da incineração em forno mufla. A partir da TFSA (terra fina seca ao ar) foram pesados 20g de solo que foram maceradas em gral e passadas em peneira de 80 mesh. Do material passado na peneira, foram retirados 5g e acondicionados em cadinhos de porcelana mantidos em estufa por 24h com temperatura de 65°C. As amostras retiradas da estufa são mantidas em dessecador para esfriar, pesadas e levadas ao forno mufla por 6h em temperatura de 600°C para incineração da matéria orgânica. Após este tempo, as amostras são acondicionadas novamente em dessecador e pesadas para obtenção da massa após a incineração. O teor de matéria orgânica do solo (MOS)(a) é obtido a partir da seguinte equação:

$$MOS = \frac{(Ms - Mr)}{Ms} \times 1000 \quad \text{(a)}$$

Onde:
MOS = matéria orgânica do solo;
Ms = massa do solo seco a 65°C, em g;
Mr = massa do resíduo após mufla a 600°C, em g.

De acordo com Teixeira et al. (2017), esse método é especialmente indicado para solos com altos teores de matéria orgânica, apesar de não discriminar os componentes do solo. Carmo e Silva (2012) consideram que o método da mufla permite estimar o teor de C total de resíduos compostados.

A determinação do Carbono Orgânico Total (COT) foi feita dividindo-se pelo índice 1,724, utilizado para determinação do COT quando derivado do valor da MOS (MACHADO et al., 2003).

O Estoque de Carbono (EC) foi determinado a partir da seguinte equação:

$$EC = (COT \times Ds \times e) / 10$$

Onde:
EC = estoque de carbono;
COT = Carbono Orgânico Total;
DS = Densidade do Solo;
e = espessura do horizonte ou camada amostrada.

RESULTADOS

Na área analisada, os valores obtidos da DS foram considerados relativamente baixos, o que reflete diretamente no teor de matéria orgânica, bem como nas condições de uso e cobertura vegetal da região. O menor valor registrado foi de 0,41 g cm-3 no ponto 19, enquanto no ponto 11 foi observado o maior valor, com 0,99 g cm-3 (Tabela 1).

A redução da DS é nítida para os pontos amostrados em altitudes mais elevadas. A partir do ponto 17, localizado a 1.900 m de altitude, a DS não ultrapassa 0,70 g cm-3 (Figura 5). Especificamente, nos pontos 17, 18 e 19, os valores de DS atingem no máximo 0,46 g cm-3 (ponto 18). Essa baixa densidade está diretamente relacionada à presença de um espesso horizonte O (serapilheira) nesses três pontos, que contribui para o acréscimo de matéria orgânica e, consequentemente, impacta a densidade do solo (GUERRA e CUNHA, 2018).

Os pontos 21, 22, 23 e 24 localizados acima dos 2.100 m de altitude apresentam DS oscilando entre 0,51 g cm-3 (ponto 24) e 0,62 g cm-3 (pontos 21 e 22).

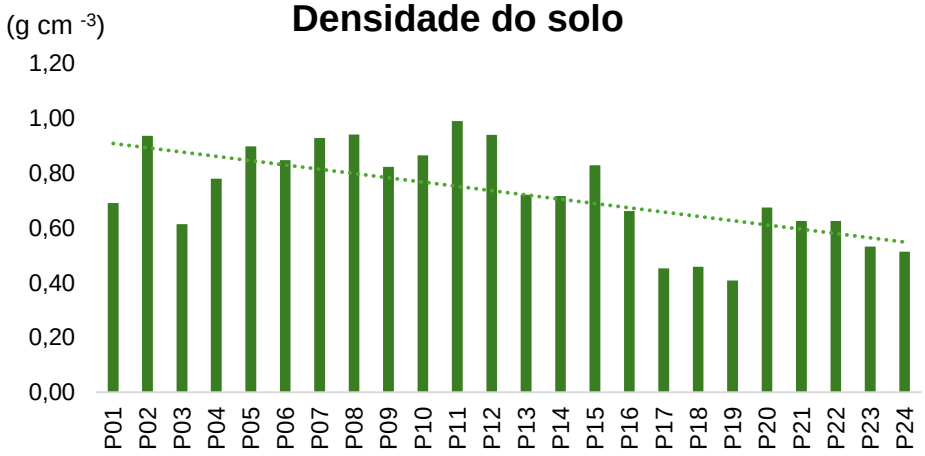
Observa-se que há uma tendência de redução da DS com a altitude (Figura 5). Os pontos amostrados nas altitudes mais baixas apresentam DS próximas a 1 g cm-3.

Tabela 1. Densidade do Solo (DS) das amostras de solo coletadas no Instituto Alto Montana.

Perfil	Prof. (cm)	DS (g cm^{-3})	Perfil	Prof. (cm)	DS (g cm^{-3})
P01	15 – 20	0,69	**P13**	out/20	0,72
P02	17 – 22	0,94	**P14**	25 -30	0,72
P03	0 – 10	0,61	**P15**	25 - 35	0,83
P04	10 – 20	0,78	**P16**	out/20	0,66
P05	12 – 17	0,9	**P17**	20 - 30	0,45
P06	10 – 15	0,85	**P18**	0 - 10	0,46
P07	10 – 20	0,93	**P19**	0 - 10	0,41
P08	10 – 20	0,94	**P20**	out/20	0,67
P09	10 – 20	0,82	**P21**	13 - 17	0,62
P10	10 – 20	0,86	**P22**	13 - 17	0,62
P11	10 – 20	0,99	**P23**	out/15	0,53
P12	10 – 20	0,94	**P24**	0 - 10	0,51

Fonte: Autores, 2024.

Figura 5. Densidade do Solo (DS) das amostras de solo coletadas na Fazenda Pinhão Assado.



Fonte: Autores, 2024.

A matéria orgânica no solo (MOS) exerce um papel essencial na oferta de serviços ecossistêmicos, gerando benefícios tanto para a sociedade quanto para a preservação de outros ecossistemas (VEZZANI, 2015; PARRON et al., 2015). O teor de matéria orgânica foi determinado em cada amostra, permitindo a obtenção da concentração da MOS por horizonte. Para calcular a quantidade média de MOS em cada perfil, somou-se os valores de MOS para cada um dos horizontes e dividiu-se pelo número de amostras no perfil.

A Tabela 2 apresenta os valores de MOS e COT. Os dados mostram que os perfis de solo amostrados nas altitudes mais baixas, entre 1.400 m e 1.500 m apresentam concentrações de MOS acima

de 300 g kg-1. Os pontos 11 a 13 apresentam os mais baixos valores de MOS. Por outro lado, os maiores valores de MOS ocorrem a partir do ponto 20, nas altitudes superiores a 2.000 m. Por se tratar de dados correlacionáveis quando a MOS aumenta, o COT também aumenta e vice-versa.

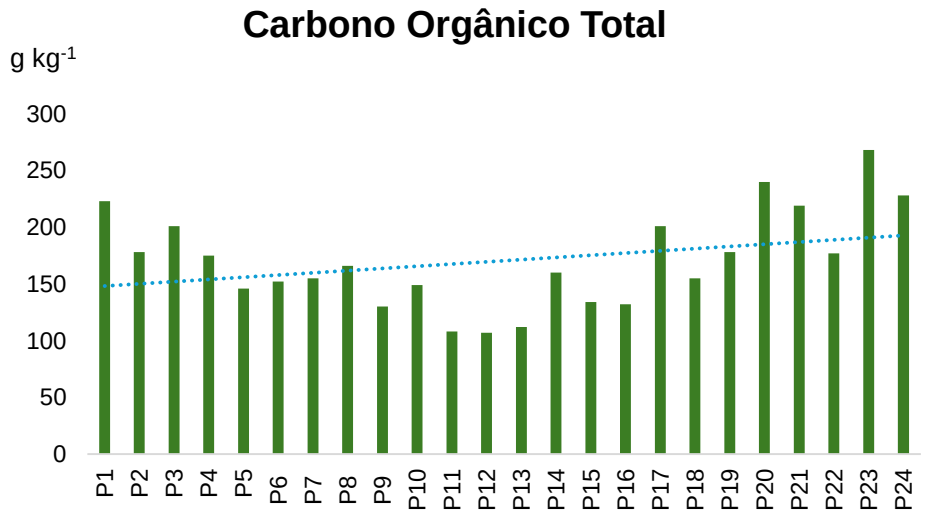
A Figura 6 apresenta a distribuição do COT nos perfis analisados, evidenciando uma redução significativa do COT entre os pontos 11 e 13. Além disso, a linha de tendência plotada indica uma correlação positiva entre o COT e a altitude, sugerindo uma elevação gradual à medida que a altitude aumenta, assim como encontrado por Azevedo (2018), Alves et al. (2010) e Vieira et al. (2011).

Tabela 2. Dados médios de matéria orgânica e carbono orgânico nos perfis de solo coletados na Fazenda Pinhão Assado.

Perfil	Prof. Total hz (cm)	MOS (g kg^{-1})	COT (g kg^{-1})	Perfil	Prof. total hz. (cm)	MOS (g kg^{-1})	COT (g kg^{-1})
P01	0 – 30	385	223	**P13**	10 – 100	193	112
P02	0 – 22	306	178	**P14**	20 – 80	276	160
P03	0 – 55	347	201	**P15**	0 – 130	230	134
P04	10 – 50	302	175	**P16**	0 – 80	227	132
P05	0 – 70	252	146	**P17**	20 – 110	347	201
P06	0 – 60	263	152	**P18**	40 – 120	268	155
P07	0 – 160	268	155	**P19**	40 – 150	307	178
P08	0 – 90	286	166	**P20**	10 – 30	414	240
P09	0 – 50	224	130	**P21**	0 – 30	377	219
P10	0 – 70	256	149	**P22**	0 – 30	304	177
P11	0 – 100	187	108	**P23**	10 – 30	461	268
P12	0 – 100	184	107	**P24**	0 – 25	392	228

Fonte: Autores, 2024.

Figura 6. Valor do Carbono Orgânico Total (COT) por perfil



Fonte: Autores, 2024.

O Estoque de Carbono (EC) está diretamente relacionado à disponibilidade de matéria orgânica, à decomposição, ao clima, tipo de solo e o manejo da terra. Refletindo não apenas a concentração de carbono nos solos, mas também a capacidade de estocar este elemento que está diretamente relacionado com a espessura do horizonte A dos solos, teor de argila e outros fatores. Carvalho et al. (2023) destacam a importância de entender essa dinâmica em ecossistemas tropicais florestados.

Observou-se maior estoque de carbono nos perfis mais profundos (Tabela 3). Os perfis de solos com horizontes A menos espessos, a despeito de apresentarem concentrações de carbono elevadas, se caracterizaram por menores EC. Os perfis 7 a 15 são aqueles que apresentam maior estoque de carbono. Os perfis 07, 08 e 15 apresentam, respectivamente, 1.729 Mg C ha-1, 1.402 Mg C ha-1 e 1.328 Mg C ha-1. Destacam-se neste momento os perfis 11 e 13, por apresentar as menores concentrações de COT, mas que apresentaram EC de 964 Mg C ha-1 e 724 Mg C ha-1, respectivamente. Considerando as variações entre os diversos pontos, o estoque de carbono para a área da fazenda Pinhão Assado é de 673 Mg C ha-1. Quando multiplicado pela área total da fazenda, a quantidade de carbono estocado nos solos é de 686.042 Mg C ha-1.

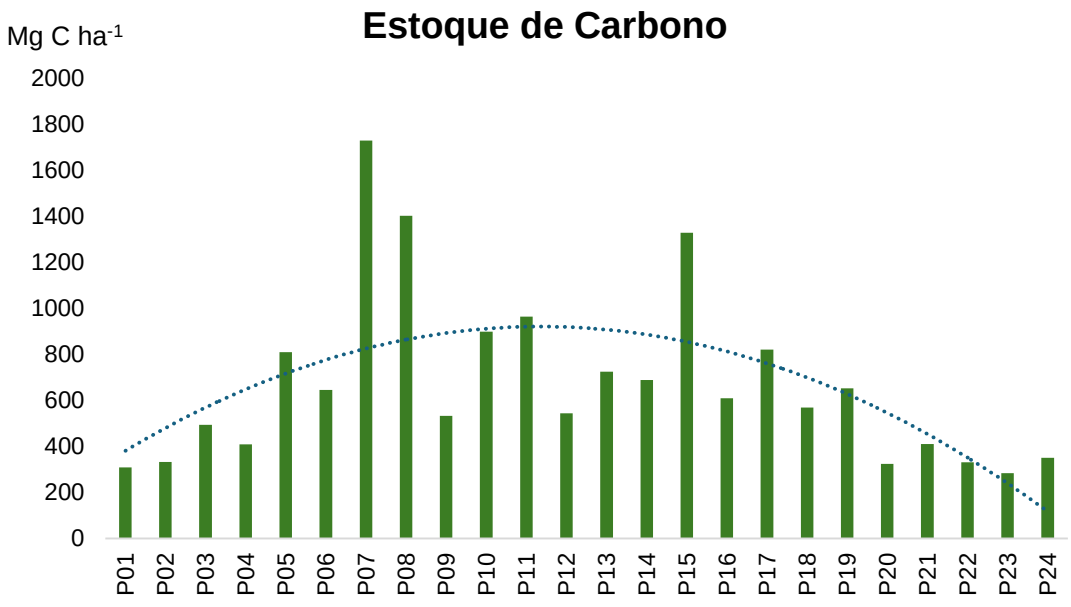
A Figura 7 apresenta a linha de tendência polinomial da distribuição do estoque de carbono, evidenciando o aumento do EC entre os pontos 7 e 15. Essa tendência destaca de forma clara a variação do carbono ao longo dos pontos analisados.

Tabela 3. O Estoque de Carbono (EC) para cada um dos perfis amostrados.

Perfil	Prof. total hz (cm)	EC (Mg C ha^{-1})	Perfil	Prof. total hz. (cm)	EC (Mg C ha^{-1})
P01	0 – 30	308	**P13**	10 – 100	724
P02	0 – 22	332	**P14**	20 – 80	688
P03	0 – 55	494	**P15**	0 – 130	1328
P04	10 – 50	409	**P16**	0 – 80	609
P05	0 – 70	810	**P17**	20 – 110	820
P06	0 – 60	645	**P18**	40 – 120	569
P07	0 – 160	1729	**P19**	40 – 150	652
P08	0 – 90	1402	**P20**	10 – 30	324
P09	0 – 50	533	**P21**	0 – 30	410
P10	0 – 70	899	**P22**	0 – 30	331
P11	0 – 100	964	**P23**	10 – 30	284
P12	0 – 100	544	**P24**	0 – 25	350

Fonte: Autores, 2024.

Figura 7. Distribuição do estoque de carbono, com destaque para os pontos 7 a 15, cujos solos, possuem maior capacidade de estocar carbono.



Fonte: Autores, 2024.

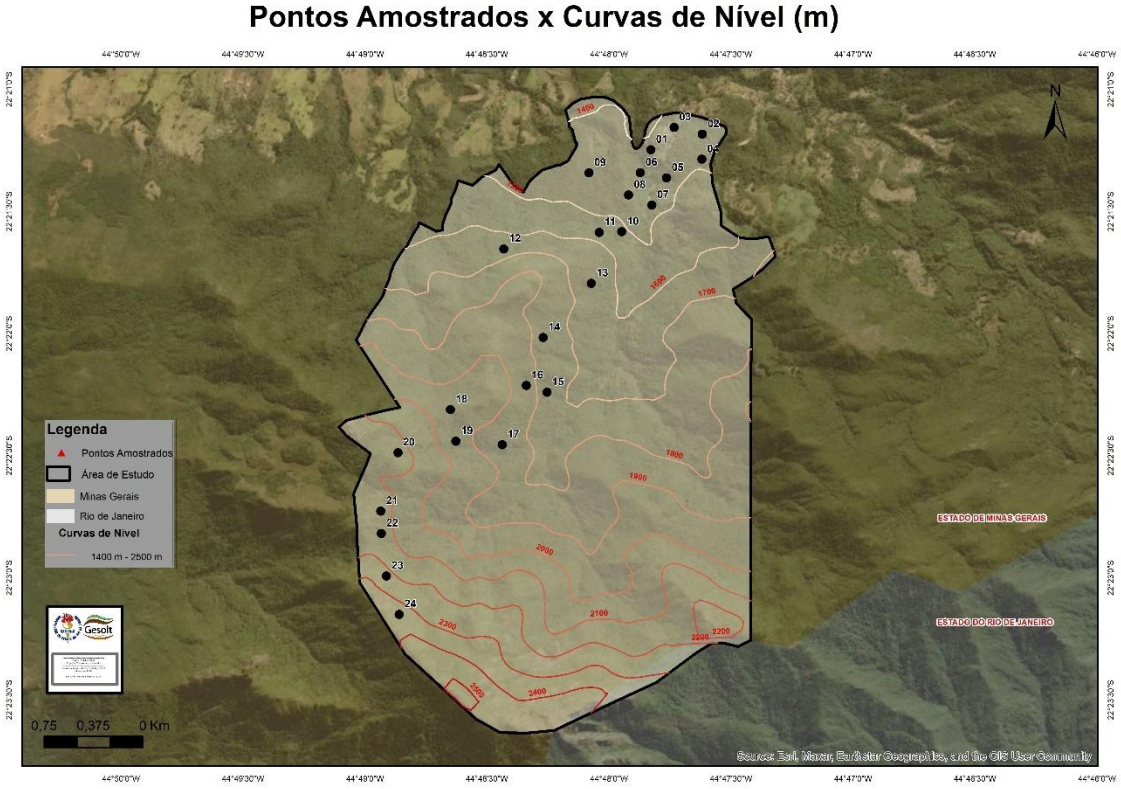
A tabela 5 apresenta, de forma complementar à Figura 7, a distribuição do EC em diferentes faixas altitudinais ao longo dos pontos amostrados (Figura 8). Destacando que o maior valor de EC foi registrado entre o intervalo de 1.700 e 1.800 metros (Figura 4), possivelmente influenciado por fatores de como a maior presença de MO e a vegetação mais densa.

Tabela 5. Média do Estoque de Carbono (EC) por altitude.

Estoque de Carbono (Mg C ha^{-1})	
Altitude	Média de EC
1.400 – 1.500	740
1.500 -1.600	932
1.600 – 1.700	634
1.700 – 1.800	1008
1.800 – 1.900	714
1.900 – 2.000	611
2.000 – 2.200*	355
2.200 – 2.300	284
2.300 – 2.400	350

Fonte: Autores, 2024.
*Não houve coleta entre 2.000 e 2.100 metros de altitude.

Figura 8. Pontos amostrados e faixas de altitude na área de estudo.



Fonte: Autores, 2024.

DISCUSSÃO

Assim como em outras áreas da Serra da Mantiqueira, a Fazenda Pinhão Assado apresenta distintas zonas morfológicas, caracterizada por variações de altitude, declividade e forma das encostas (ARTHUR e PÊGAS, 2013; MARQUES NETO, 2017; 2018; AMBIENTAL CONSULTING E MARIMAR, 2024). Nas regiões de maior altitude e declividade, não existe o horizonte B, enquanto nas áreas de menor declividade já maior potencial para o acúmulo de material intemperizado, refletindo nas dinâmicas geomorfológicas e pedológicas da região (ROSSI e QUEIROZ NETO, 2001; SILVA et al., 2007; MARTINS et al., 2019).

Nas regiões de menor altitude, as temperaturas médias tendem a ser mais elevadas o que resulta em um menor acúmulo de COT nesses ambientes (CARVALHO, et. al, 2023). No entanto, apesar das condições de clima desfavoráveis ao acúmulo superficial do COT, esses trechos apresentam solos com horizontes mais profundos e, consequentemente, contribuem para um maior estoque de carbono.

Os resultados obtidos para a DS, variando entre 0,41 g cm-3 e 0,99 g cm-3, foram muito satisfatórios, uma vez que os valores abaixo de 1,00 g cm-3 indicam uma maior participação dos componentes orgânicos na constituição dos horizontes superficiais. A baixa densidade do solo está também diretamente associada à maior porosidade, o que favorece a infiltração e percolação da água no solo.

Os pontos com densidades do solo mais elevadas apresentam teores de MOS e COT mais baixos (Figuras 9, 10 e 11). A distribuição dos pontos com maior estoque de carbono (EC) não segue a mesma tendência observada para a distribuição da MOS e COT. Nos pontos com maior EC a espessura do horizonte A é maior. Apesar de os trechos de maior altitude exibirem concentrações elevadas de matéria orgânica do solo (MOS) e COT, não são nesses trechos que se encontra o maior estoque de carbono (Figuras 10, 11 e 12).

Figura 9: BoxPlot da densidade do solo, onde ser observa que a maior parte dos valores de DS estão acima de 0,60 g cm^{-3}.

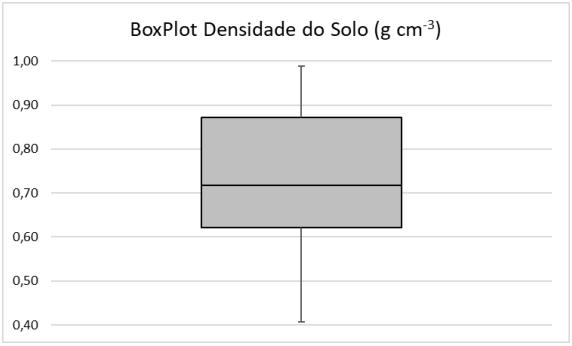


Figura 10: Distribuição dos teores de MOS.

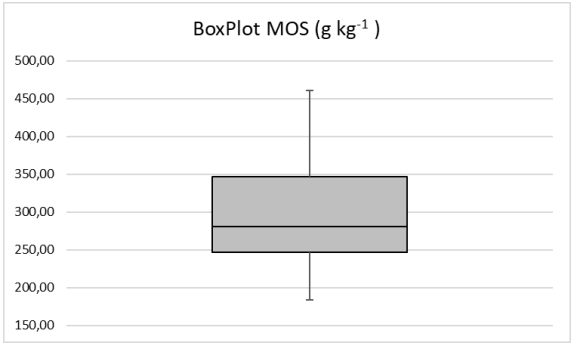
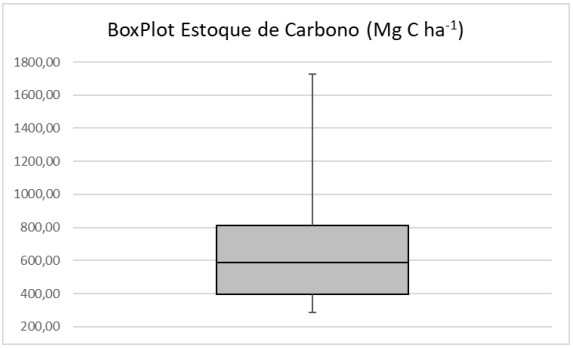


Figura 11: Distribuição dos teores de COT

Figura 12: Distribuição do estoque de carbono.



Fonte: Autores, 2024.

CONCLUSÕES

Os dados indicam uma correlação entre a altitude e a maior concentração de carbono orgânico e matéria orgânica nos horizontes A. Nos trechos onde a vegetação é composta por espécies de porte arbóreo e/ou arbustivo e os solos são mais espessos, a concentração de carbono é significativamente maior. Assim, a combinação de altitudes elevadas, vegetação de maior porte e declividades que favorecem solos mais profundos é essencial para o aumento do estoque de carbono.

Por sua vez, a MOS e o COT são mais elevados nos setores de maior altitude, notadamente acima de 2.000 metros. Essa maior concentração está mais relacionada com a altitude do que com o tipo de vegetação, que nesses locais é predominantemente formada por campos de altitude.

Não é correto afirmar que uma maior concentração de MOS e COT resulte em um maior estoque de carbono. Fatores como o tipo de vegetação (campos de altitude) e a presença de declividades mais acentuadas que não permitem acúmulo de material intemperizado são fatores preponderantes para o menor estoque de carbono.

No caso da fazenda Pinhão Assado, os solos apresentam um estoque aproximado de 673 Mg C ha-1. Quando multiplicado pela área total da fazenda, chega-se a 686.042 Mg C ha-1ou 686.042 toneladas de carbono estocado por hectare. Além de desempenharem um papel fundamental na conservação ambiental e na prestação de serviços ecossistêmicos, como a retenção de carbono atmosférico, os solos deste setor da Serra da Mantiqueira apresentam características que indicam boa estabilidade estrutural e condições favoráveis à infiltração da água da chuva.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos neste momento, a parceria estabelecida com a fazenda Pinhão Assado que garantiu infraestrutura necessária para a coleta de amostras. Ao CNPq e a CAPES pela concessão de bolsas de IC e de Mestrado, respectivamente.

REFERÊNCIAS

AMBIENTAL CONSULTING; MARIMAR. Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de Itamonte - MG. Itamonte, 2024.

ARTHUR, E. B.; PÊGAS, P. L. L. Plano de Manejo da Reserva Particular do Patrimônio Natural Alto Montana da Serra Fina. Itamonte, 2013.

ARRUDA, G. P. DE.; DEMATTÊ, J. A. M.; CHAGAS, C. DA S. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 37, n. 2, p. 327–338, mar. 2013.

AZEVEDO.A.D. et.al. Estoque de Carbono em Áreas de Restauração Florestal da Mata Atlântica. Floresta, Curitiba, PR, v. 48, n. 2, p.183-194, abr/jun. 2018. ISSN eletrônico 1982-4688 DOI: 10.5380/rf.v48 i2.54447

BISPO et. al. Accounting for Carbon Stocks in Soils and Measuring GHGs Emission Fluxes from Soils: Do We Have the Necessary Standards?. Front. Environ. v. 5, 2017. Sci. 5:41. doi: 10.3389/fenvs.2017.00041

BRASIL. Lei nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2006.

BURGHARDT, W.; HEINTZ, D.; HOCKE, N. Soil Fertility Characteristics and Organic Carbon Stock in Soils of Vegetable Gardens Compared with Surrounding Arable Land at the Center of the Urban and Industrial Area of Ruhr, Germany. Eurasian Soil Science, 2018, Vol. 51, nº 9, p. 1067-1079. Pleiades Publishing, Ltd., 2018.

CALONEGO, J. C.; DOS SANTOS, C. H.; TIRITAN, C. S.; CUNHA JÚNIOR, J. R. Estoques de Carbono e Propriedades Físicas de Solos Submetidos a Diferentes Sistemas de Manejo. Revista Caatinga, vol. 25, núm. 2, março-junho, 2012, pp. 128-135 Universidade Federal Rural do Semi-Árido Mossoró, Brasil.

CARMO, D. L.; SILVA, C. A. Métodos de Quantificação de Carbono e Matéria Orgânica em Resíduos Orgânicos. Rev. Bras. Ciênc. Solo 36 (4). Ago 2012, 36:1211-1220.

CARVALHO, M. L. et. al. Stabilization of Organic Matter in Soils: Drivers, Mechanisms, na Analytical Tools – A Literature Review. Rev. Bras. Cienc. Solo. 2023;47:e0220130. Disponível em: https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220130 Acesso em: 15 abr. 2024.

CHIESSI, C. M. Tectônica Cenozoica no Maciço Alcalino de Passa Quatro (SP-MG-RJ). Dissertação (Mestrado em Geologia), Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2004. 137p.

DE ROSA, D.; BALLABIO, C.; LUGATO, E.; FASIOLO, M.; JONES, A.; PANAGOS, P. Soil Organic Carbon Stocks in European Croplands na Grasslands: How Much Have we Lost in the Past Decade?. Rev. Glob Change Biol. 2024;30:e16992.

DON, A., SCHUMACHER, J., FREIBAUER, A. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. Rev. Glob. Change Biol. v. 17, 1658-1670, 2011.

HILSON, A. L. et al. The Spatial Distribution of Soil Organic Carbon in Tidal Wetland Soils of the Continental United States. Rev. Glob Change Biol. 2017, 23:5468–5480. DOI: 10.1111/gcb.13811

FIDALGO, E. C. C. et. al. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento: Estoque de Carbono nos Solos do Brasil. Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento / Embrapa Solos, ISSN 1678-0892 ;121)

KLEBER, M., R. MIKUTTA, M. S. TORN, AND R. JAHN. Poorly Crystalline Mineral Phases Protect Organic Matter in Acid Subsoil Horizons. European Journal of Soil Science 56, nº 6:717-725. 2005..

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. Geoderma, Amsterdam, v. 123, p. 1-22, 2004

LEPSCH, I. F. 19 lições de pedologia. 1ª ed. São Paulo: Oficina de textos 2011.

LIEBMAN, P. et. al. Biogeochemical limitations of carbon stabilization in forest subsoils. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 185(1):1-9, 2021. DOI:10.1002/jpln.202100295. Disponível em: . Acessado em: 20 fev. 2024.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SANTOS, F. S. Métodos de Preparo de Amostras e de Determinação de Carbono em Solos Tropicais. Circular Técnica 19. Embrapa. Rio de Janeiro, 2003.

MARQUES NETO, R. O HORST DA MANTIQUEIRA MERIDIONAL: PROPOSTA DE COMPARTIMENTAÇÃO MORFOESTRUTURAL PARA SUA PORÇÃO MINEIRA. Revista Brasileira de Geomorfologia, [S. l.], v. 18, n. 3, 2017. DOI: 10.20502/rbg.v18i3.1118. Disponível em:

MARQUES NETO, R. As regiões montanhosas e o planejamento de suas paisagens: proposta de zoneamento ambiental para a Mantiqueira meridional mineira. Confins [Enligne], 35 (1) 2018.

MIRANDA, F. S. M.; PESSOA, F. A.; FRAGOSO, L. F. K. R.; D'ARROCHELLA, M.L.G. A Relação entre Topografia e Estoque de Matéria Orgânica no Parque Nacional da Tijuca-RJ. In: XXX Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural da UFRJ, 2008, Rio de Janeiro. Anais da XXX Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural da UFRJ, 2008.

MORGAN, R. P. C. Soil Erosion and Conservation. 3. ed. England: Blackwell, 2005.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. DE; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (ed.). Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais. In: Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília, DF: Embrapa, 2015

PEREIRA, A. B. Mata Atlântica: Uma Abordagem Geográfica. Rev. Nucleus, vol. 6, Nº. 1, 2009, págs. 1-27. ISSN-e 1982-2278. Disponível em: Acesso em: 02 set. 2023

FERRAZ, R. P. D. et. al. Serviços ecossistêmicos; instrumentos legais e políticos no Brasil. In: Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz, Rachel Bardy Prado, Lucília Maria Parron, Mônica Matoso Campanha. (Org.). Marco Referencial em Serviços Ecossistêmicos. 1ed.Brasília: Embrapa, 2019, v. 1, p. 57-88.

ROSSI, M.; QUEIROZ NETO, J. P. Relação solo/paisagem em regiões tropicais úmidas: o exemplo da Serra do Mar em São Paulo, Brasil. Revista do Departamento de Geografia, São Paulo, Brasil, v. 14, p. 11–23, 2011. DOI:10.7154/RDG.2001.0014.0001. Acesso em: 15 dez. 2024.

SANTOS, H. G. dos; et al., Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. rev. e ampl. 2018, Brasília, DF: Embrapa, 2018. ISBN: 978-85-7035-817-2

SANTOS, R. C. M. Mata Atlântica: Características, biodiversidade e a história de um dos biomas de maior prioridade para conservação e preservação de seus ecossistemas. 2010. 31F. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas do Centro Universitário Metodista Izabela Hendrix, Belo Horizonte (MG), 2010.

SANTOS, A. N. dos; BRITO, L. P. de; SIQUEIRA, F. L. T. de; FILHO, I. S. P. Desafios e Progressos: O Impacto das Políticas Ambientais Contemporâneas na Conservação dos Recursos Naturais. Revista Políticas Públicas & Cidades, [S. l.], v. 13, n. 2, p. e799, 2024. DOI: 10.23900/2359-1552v13n2-64-2024. Disponível em: . Acesso em: 6 jan. 2025.

SILVA, A. C. et al. Relações entre matéria orgânica do solo e declividade de vertentes em toposseqüência de Latossolos do Sul de Minas Gerais. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 31, n. 5, p. 1059–1068, set. 2007.

TEIXEIRA, P. C. et al. Manual de métodos de análise de solo. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF. Embrapa, 2017.

VIEIRA, S. A et. al. A. Stocks of carbon and nitrogen and partitioning between above- and belowground pools in the Brazilian coastal Atlantic Forest elevation range. Ecology and Evolution, New Jersey, v. 1, n. 3, p. 421 - 434, 2011.