

QUALIDADE DO SOLO EM AMBIENTES FLORESTAIS: UMA AVALIAÇÃO INVESTIGATIVA DOS ATRIBUTOS FÍSICOS DO SOLO

SOIL QUALITY IN FOREST ENVIRONMENTS: AN INVESTIGATIVE EVALUATION OF SOIL PHYSICAL ATTRIBUTES

Guilherme Gavlak^a, Fernanda Filipaki^b, Robert William Florentino^a

^aUniversidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), ^bUniversidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP)

eng.guilhermegavlak@gmail.com, f.filipaki@unesp.br, robertwilliam1517@gmail.com

Submissão: 10 de março de 2024

Aceite: 22 de junho de 2024

Resumo

Os remanescentes florestais desempenham um papel crucial na preservação das propriedades físicas naturais do solo, contribuindo para a qualidade ambiental dos ecossistemas. Neste estudo, foram avaliadas as características físicas de um solo inalterado em um fragmento de floresta no município de Irati, no Paraná. As amostras de solo foram coletadas em uma área com vegetação densa em estágio avançado de sucessão ecológica, caracterizada por espécies arbóreas nativas de grande porte e dossel fechado, por meio das análises da densidade, da porosidade, do índice de compactação do solo e da estabilidade de agregados. Os valores de densidade do solo encontrados na área de estudo estavam dentro do esperado para uma área de floresta, sendo que solos com menor densidade apresentam um baixo índice de compactação, o que influencia no desenvolvimento das plantas e na infiltração de água. Os valores de porosidade do solo foram elevados, indicando ótimos índices de porosidade. No índice de compactação do solo, os pontos com menor compactação tendem a exibir menor resistência à penetração, devido à maior porosidade e índice de vazios. Na análise dos agregados, foi observado que o perímetro de 30x30 metros apresentou os menores valores de índice de estabilidade de agregados, indicando possível fragilidade da estrutura do solo, o que pode ter implicações significativas para suas propriedades físicas e químicas. Portanto, concluiu-se que as áreas de floresta desempenham um papel importante na preservação das características físicas do solo avaliadas, contribuindo para manter um ambiente saudável para o desenvolvimento ecossistêmico.

Palavras-chave: densidade; porosidade; compactação; preservação.

Abstract

Forest remnants play a crucial role in preserving the natural physical properties of soil, contributing to the environmental quality of ecosystems. In this study, the physical characteristics of an undisturbed soil in a forest fragment in the municipality of Irati, Paraná, were evaluated. Soil samples were collected in an area with dense vegetation in an advanced stage of ecological succession, characterized by native tree species of large size and closed canopy through the analysis of soil density, porosity, soil compaction index, and aggregate stability. The soil density values found in the study area were within the expected range for a forest area, with soils of lower density showing a low soil compaction index, which influences the development of plants and water infiltration. The soil porosity values were high, indicating optimal porosity levels. In the soil compaction index, points with lower compaction tend to show lower penetration resistance, due to higher porosity and void index. In the analysis of aggregates, it was observed that the 30x30 meter perimeter had the lowest aggregate stability index values, indicating possible fragility of the soil structure, which may have significant implications for its physical and

chemical properties. Therefore, it is concluded that forest areas play an important role in preserving the evaluated physical characteristics of the soil, contributing to maintaining a healthy environment for ecosystem development.

Key-words: density; porosity; compaction; preservation.

1 INTRODUÇÃO

O manejo sustentável dos recursos naturais, particularmente do solo e da água, tornou-se um tema de crescente relevância devido ao aumento das atividades antropogênicas. Esta intensificação das ações humanas tem gerado preocupações significativas em relação à sustentabilidade e à qualidade desses recursos vitais (Araújo; Goedert; Lacerda, 2007). A qualidade do solo pode ser conceituada como a capacidade de esse recurso exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema, para sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade ambiental e contribuir para a saúde das plantas, dos animais e humana (Doran; Parkin, 1994; Damiba *et al.*, 2024). Porém, devido à exploração sem controle por parte dos seres humanos, e o uso e ocupação da terra desordenado, os serviços ecossistêmicos prestados por esses ambientes têm sido afetados de maneira direta e a sociedade encontra dificuldades para se manter de forma sustentável (Grizzetti *et al.*, 2016). É necessário usar os recursos naturais de forma adequada para suprir as necessidades humanas, mas sem prejudicar as gerações futuras. Com isso, devemos nos atentar na qualidade do solo, pois é um recurso natural importante, principalmente na geração de alimentos (Marins; Lordelo, 2023).

A qualidade dos atributos do solo propicia condições adequadas para o crescimento e o desenvolvimento das plantas e para a manutenção da diversidade de organismos que nele habitam (Doran; Parkin, 1994). No solo, esses atributos se relacionam fisicamente, quimicamente e biologicamente, controlando os processos e os aspectos relacionados à sua variação no tempo e no espaço, logo, qualquer modificação que ocorra, pode alterar diretamente sua estrutura e sua atividade biológica e, conseqüentemente, sua fertilidade, com reflexos nos agroecossistemas (Brookes, 1995), acarretando perdas de solo e da qualidade dele.

Em áreas de cultivo, o solo enfrenta diversas formas de interferência, que podem resultar em uma

diminuição da sua qualidade ao longo do tempo. As características físico-químicas do solo são afetadas pelo manejo adotado, pois o preparo do solo pode impactar diretamente em seus atributos físicos durante esse período (Hamza; Anderson, 2005). Algumas dessas interferências podem incluir compactação, erosão, alterações na estrutura do solo e na sua composição química, entre outras, todas influenciando a sua capacidade de suporte às plantas e sua produtividade (Lin *et al.* 2022). Porém, quando o solo é manejado de forma adequada, o desenvolvimento da planta e o crescimento de suas raízes apresentam melhora, podendo assim aumentar a produtividade da cultura. Portanto, realizar o manejo do solo com técnicas sustentáveis pode contribuir na melhoria dele, evitando principalmente os processos erosivos e o arraste de sedimentos para as partes mais baixas do terreno, geralmente em rios e lagos, acarretando o assoreamento destes, uma vez que a retirada do material vegetal presente pode ocorrer devido à redução da porosidade do solo, o que limita a infiltração da água da chuva e aumenta a probabilidade de escoamento superficial. Este aumento no escoamento pode intensificar a erosão do solo, resultando ainda em uma perda significativa de fertilidade (Oliveira-Andreoli *et al.*, 2020).

Já o solo presente em um ambiente inalterado por ações antrópicas tende a ter melhores características físicas, químicas e biológicas do solo, como, por exemplo, uma menor compactação, menor densidade, maior porosidade, maiores teores de material orgânico em sua composição, condições que favorecem a infiltração de água no solo melhorando o abastecimento dos lençóis freáticos, sendo este um solo rico para o desenvolvimento da flora local, conseqüentemente mantendo suas condições originais, facilitando assim o desenvolvimento do ecossistema local. Sendo assim, é de grande importância manter a floresta de forma intacta, a fim de evitar diversos prejuízos como, por exemplo, enchentes, que podem ocorrer devido à perda da mata ciliar. Outros problemas são os processos erosivos, a perda de biodiversidade, a

diminuição da recarga dos aquíferos devido à compactação do solo, além de mudanças climáticas (Lal, 2015; Pimentel *et al.*, 1995).

Assim, pode-se afirmar que a qualidade do solo é influenciada significativamente pela ação humana. Solos que não sofrem interferência antrópica tendem a apresentar melhor qualidade. No entanto, muitas áreas florestais estão sendo degradadas em decorrência do avanço das atividades antrópicas. A remoção da vegetação nativa resulta em perda de qualidade do solo, levando à degradação dele. Esta degradação ocorre devido a uma série de fatores, incluindo a redução da cobertura vegetal, compactação do solo, diminuição da infiltração de água e aumento do escoamento superficial, que promovem processos erosivos (Araújo *et al.*, 2012).

Todavia, realizar o monitoramento do solo contribui para manter a sua qualidade, pois conhecendo a condição do solo podem ser utilizadas técnicas que contribuem na melhora das características do solo. As avaliações do solo podem ser feitas por meio de análises das características químicas, físicas, biológicas e hidrológicas do solo. A partir dessas análises é possível conhecer a verdadeira qualidade do solo e, assim, utilizar técnicas que podem ser úteis no processo de restauração (Silva *et al.*, 2021).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os atributos físicos de um solo inalterado em um fragmento de floresta no município de Irati-PR, com fins de ressaltar a importância da preservação do mesmo solo, favorecendo o desenvolvimento da biodiversidade local e a manutenção de um meio ambiente equilibrado.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo, na qual foi realizada a caracterização dos atributos físicos do solo em ambiente de floresta, está localizada na cidade de Irati, no estado do Paraná, Brasil. Essa região é caracterizada pela presença da Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como Floresta de Araucária, devido à abundância da espécie *araucaria angustifolia* em seu estrato arbóreo. O solo predominante na região é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, conforme especificado pelo Mapa de Solos do Estado do Paraná disponível na plataforma GEOINFO

(Embrapa, 2021). Esse tipo de solo é tipicamente profundo, bem drenado e ácido, que pode limitar a disponibilidade de alguns nutrientes essenciais como fósforo, cálcio e magnésio. A acidez também pode influenciar a toxicidade de alguns elementos como o alumínio, que pode ser tóxico para as plantas em concentrações elevadas. Em decorrência dessas características físicas e químicas presentes nessa tipologia de solo presente na região, a vegetação e a biodiversidade do local são influenciadas diretamente de forma positiva em função da ciclagem dos nutrientes e do material orgânico presente nos mesmos criando habitats propícios para o desenvolvimento do ecossistema.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfb, definido como subtropical úmido. Os invernos na região apresentam geadas severas, enquanto os verões são amenos. A precipitação média anual é de 1476 mm, e a temperatura média nos meses mais quentes é de 22 °C, enquanto nos meses mais frios é menor que 18 °C (Maack, 1981). Cabe destacar que no presente estudo, apenas a área com característica florestal preservada foi avaliada, sem fins de comparação com as demais.

2.2 Coleta das amostras de solo e análises de densidade aparente e compactação

As amostras de solo utilizadas no presente estudo foram coletadas em uma região com expressiva porção vegetal. Nessa região, é característico encontrar um estágio avançado de sucessão, caracterizado por apresentar espécies arbóreas nativas de grande porte e dossel fechado. Para as coletas e análises das amostras, foi delimitada uma área de 30 m x 30 m, de acordo com a Figura 1, sendo esta a área de estudo.

Para a condução das análises de densidade aparente do solo foram realizadas coletas de amostras utilizando-se um anel volumétrico de 94,4 cm³ em cada ponto delineado na Figura 1. O anel foi inserido no solo de forma a ocupar completamente o seu volume interno, conforme estabelecido para as três profundidades medidas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm. Após a coleta de amostras de solo, foram conduzidas análises laboratoriais que envolveram a pesagem das amostras, seguida de secagem em estufa a 150 °C por um período de 24 horas. Este procedimento visou quantificar a massa seca do

solo, expressa em gramas. Utilizando-se o volume do material coletado, foi possível calcular as densidades totais de cada amostra de solo em g cm^{-3} conforme estabelecido nas metodologias dispostas por Smith e Brown (2020) e apresentado na Equação 1.

$$D_s = \frac{M_s}{V} \quad (1)$$

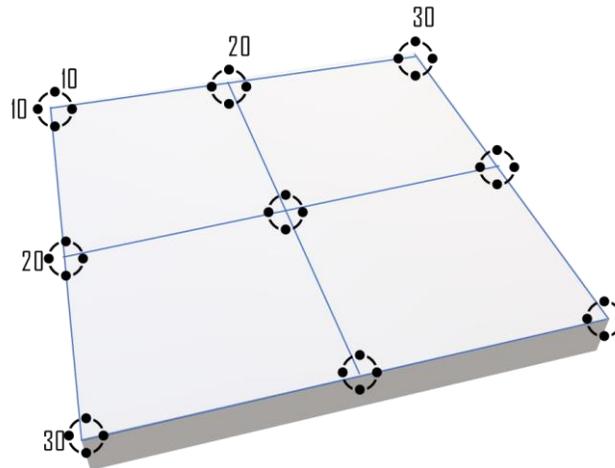
Em que:

D_s : densidade do solo (g cm^{-3});

M_s : Massa seca do solo (g);

V : volume do anel (cm^3).

Figura 1 – Esquema utilizado para realização das coletas das amostras de solo e análises dos atributos físicos em uma área de 30 m x 30 m



*Os círculos preenchidos são caracterizados pelos pontos de coletas.

**Os valores apresentados são expressos em metros.

Fonte: elaborada pelos autores.

Com o propósito de calcular a compactação do solo, ou seja, a resistência a penetração radicular, foi utilizado um equipamento conhecido como penetrômetro. Este dispositivo é composto por um peso que, ao ser solto em queda livre de uma altura constante, exerce uma força de impacto sobre o solo, resultando em uma medida do índice de penetração da haste no solo.

Os registros da penetração do penetrômetro no solo foram documentados e posteriormente inseridos em um *software* de análise de dados, utilizando-se o programa Microsoft Excel (Stolf et al., 2014). Esta ferramenta permitiu a análise e o tratamento dos dados coletados, facilitando a interpretação e a visualização dos resultados obtidos. A partir desses registros, os valores dos dados brutos foram convertidos em índices de resistência do solo, expressos em MPa, em conformidade com as profundidades de medição

estabelecidas (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, 30-40 cm, 40-50 cm e 50-60 cm).

2.3 Análise de densidade de partícula e porosidade do solo

Para que fosse possível efetuar a caracterização da análise de porosidade do solo em questão, primeiramente foi realizada a análise de densidade da partícula. Para tal procedimento, foram realizadas coletas de amostras de solo de três pontos dentro do mesmo quadrado utilizado para determinação da densidade aparente e compactação da área. A representação dos pontos de coleta na área de estudo está apresentada na Figura 2. As amostras de solo foram coletadas em profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm; após a coleta foram homogeneizadas, originando uma única amostra para cada profundidade. Cabe destacar que, para a realização de ambas as

análises, foram seguidas as metodologias dispostas Smith e Brown (2020).

Para a análise da densidade de partículas, utilizou-se o método do balão volumétrico descrito pela Embrapa (2017). Nesse procedimento, uma única amostra de solo é coletada de cada profundidade, seca, destorroado até obter-se 20 gramas. Em seguida, essa quantidade de solo é transferida para um balão volumétrico de 50 ml. Inicialmente, são adicionados 25 ml de álcool etílico 92% ao balão, que é então agitado e deixado em repouso por 24 horas para permitir a absorção do álcool pelo solo. Após esse período, o volume de

álcool é ajustado novamente até completar 50 ml. Esse procedimento é realizado em triplicata. Com base no volume de álcool consumido, é possível determinar a densidade das partículas de solo em g/cm^3 utilizando a equação 2.

$$D_p = \frac{M_s}{50 - V_{\text{álcool}}} \quad (2)$$

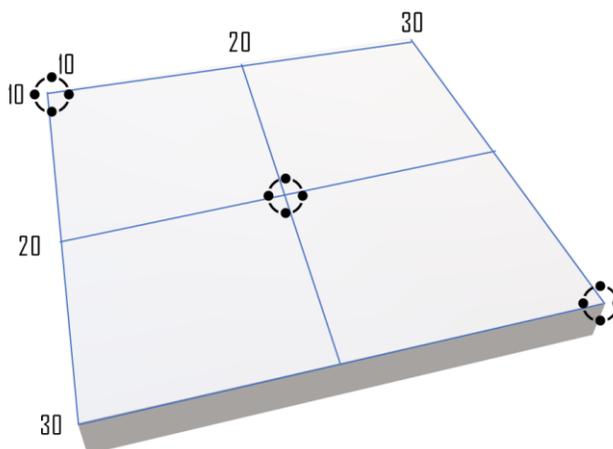
Em que:

D_p : densidade de partículas (g.cm^{-3});

M_s : Massa seca do solo (g);

$V_{\text{álcool}}$: volume de álcool gasto (mL).

Figura 2 – Esquema utilizado para realização das coletas das amostras de solo para posterior execução das análises de densidade de partícula e porosidade na área de estudo



Fonte: elaborada pelos autores.

Da mesma forma, seguindo o método estabelecido pela Embrapa (2017), a porosidade do solo é analisada determinando o volume total dos poros, que podem ser preenchidos por água ou ar. Esse método integra os dados de densidade das partículas com a densidade aparente, utilizando a equação 3 para fornecer uma medida precisa da porosidade do solo.

$$P_t = \frac{D_s - D_p}{D_p} \quad (3)$$

D_s : densidade do solo (g.cm^{-3});

D_p : densidade de partículas (g.cm^{-3}).

De posse dos resultados, utilizou-se o software *Surfer 8* para criar mapas de contorno da densidade do perímetro da floresta para cada profundidade avaliada. Este *software* permitiu a visualização

detalhada das variações de densidade do solo, facilitando a análise espacial das características físicas do solo em diferentes profundidades ao longo do perímetro florestal. Os mapas gerados proporcionam uma representação clara das áreas com diferentes densidades, auxiliando na interpretação e compreensão das propriedades do solo na área estudada (Webster; Oliver, 2007).

2.6 Análise da estabilidade de agregados

A partir das amostras de solo coletadas utilizando-se o anel volumétrico, foi separada uma porção de 25 gramas da amostra, cuidadosamente preservando-se sua estrutura original. Esta porção foi disposta sobre um papel filtro e imersa em água em uma bacia de água, permitindo-se que absorvesse a umidade necessária de forma gradual.

Após atingir o nível adequado de umidade, as amostras foram transferidas para um conjunto de peneiras graduadas. Em seguida, as peneiras contendo as amostras úmidas foram inseridas em um agitador do tipo Yoder, onde foram submetidas a um processo de agitação por 10 minutos, garantindo-se uma distribuição uniforme das partículas.

Seguindo o método de extração via úmida descrito por Yoder (1936), foram utilizadas peneiras com malhas de diferentes tamanhos, variando de maior para a menor, com diâmetros de abertura de 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm e 0,25 mm. Após o peneiramento, as amostras coletadas foram transferidas para béqueres e colocadas em estufa a 105 °C por 24 horas, sendo então pesadas (P_s) para determinação do percentual de agregado.

Para determinar a fração de areia, o solo da amostra foi separado em meio aquoso. A amostra foi submetida a uma lavagem contínua até que apenas a fração de areia permanecesse retida na peneira com abertura de 0,053 mm. As amostras contendo a fração de areia foram coletadas, transferidas para um béquer e colocadas em uma estufa a 105 °C por um período de 24 horas. Após esse processo, as amostras foram pesadas (P_a) para a determinação

do percentual de agregados presentes na fração de areia.

De posse do percentual de agregado e da massa de agregados menor que 106 mm ($wp_{0,106}$) foi possível estimar o índice de estabilidade de agregados (%) de acordo com a Equação 4:

$$IEA = \frac{P_s - wp_{0,106} - P_a}{P_s - P_a} \quad (4)$$

Em que:

IEA: Índice de Estabilidade dos Agregados (%);

Ps: porcentagem de agregados estáveis no solo (%);

Pa: porcentagem de agregados não estáveis no solo (%);

wp: umidade do solo em peso equivalente a 0,106 Mpa (%).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultado das análises de densidade aparente do solo

A Tabela 1 apresenta os dados da densidade do solo nas diferentes profundidades da área de estudo e o perímetro em que cada amostra foi coletada.

Tabela 1 – Variações na densidade do solo em diferentes pontos e profundidades do perímetro florestal em g cm⁻³

Perímetro	Profundidades (cm)		
	0-10	10-20	20-30
10 10	0,88	0,83	0,97
10 20	0,78	0,85	1,12
10 30	0,87	0,96	1,13
20 10	0,85	1,04	0,99
20 20	0,57	0,94	0,63
20 30	0,72	0,9	0,91
30 10	0,7	0,74	0,81
30 20	0,69	0,9	0,81
30 30	0,71	0,75	0,78

Fonte: elaborada pelos autores.

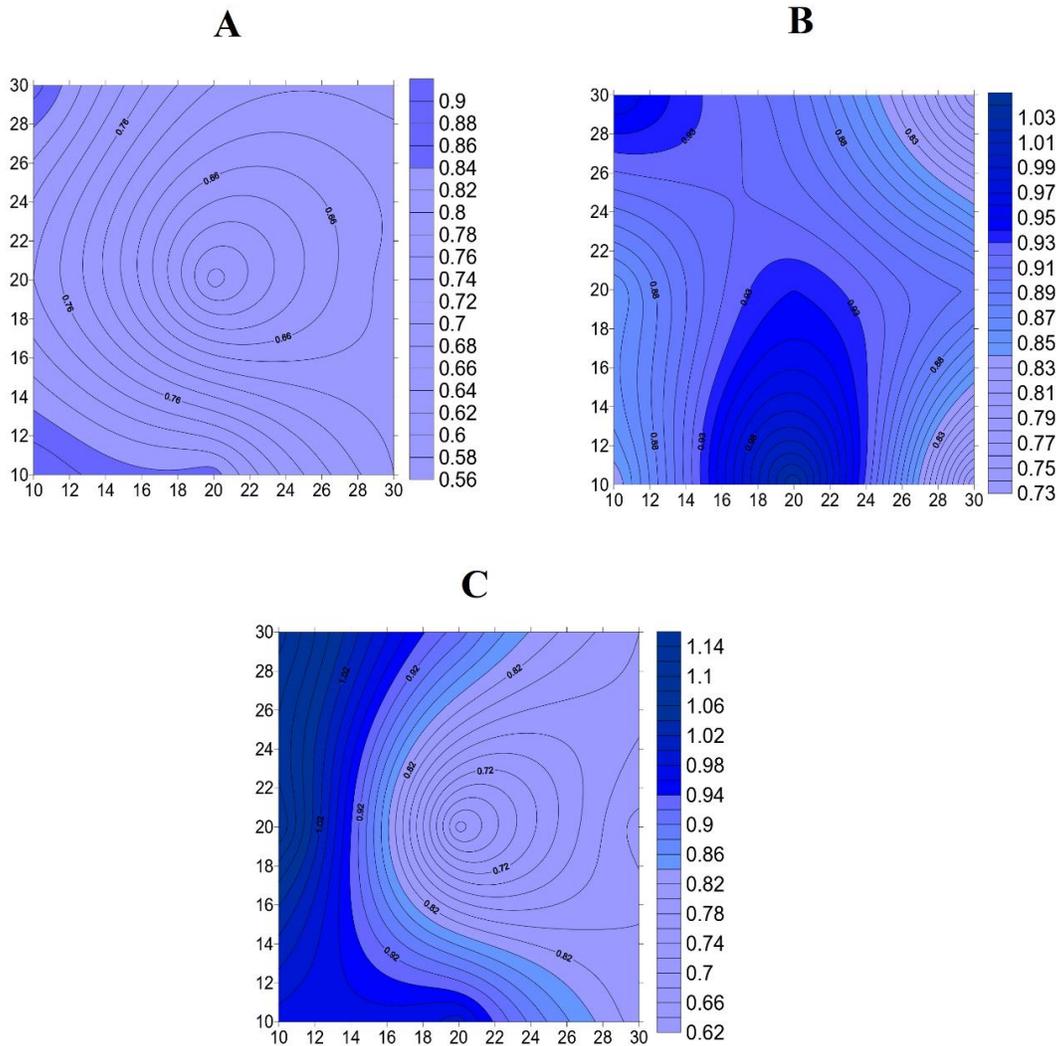
Observando-se a Tabela 1 podemos perceber que os valores de densidade são menores na primeira camada, isso sendo explicado principalmente por ser a camada que apresenta maiores quantidades de matéria orgânica do solo, contribuindo assim na melhoria da estrutura do solo, diminuindo a densidade e aumentando a quantidade

de poros do solo. As camadas com maiores profundidades geralmente são mais compactadas, dificultando a passagem de água e crescimento de raízes. Resultados próximos foram encontrados por Araújo *et al.* (2022), ao avaliar um ambiente de floresta. Nesse estudo foi verificado que a média de densidade na camada 0-5 cm foi de 1,06 g cm⁻³; já

nas camadas mais profundas 5-10 cm e 10-20 cm, a densidade do solo foi de $1,13 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,12 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente.

De posse de tais dados (Tabela 1), obtiveram-se os seguintes mapas de contorno (Figura 3) para cada profundidade avaliada.

Figura 3 – Mapa de contorno da densidade do perímetro da floresta com diferentes profundidades (A) profundidade 0-10cm, (B) profundidade 10-20cm e (C) profundidade 20-30cm



Fonte: elaborada pelos autores.

Ao analisar as imagens apresentadas nos mapas de contorno, observa-se que as áreas com cores mais escuras indicam uma densidade maior no que diz respeito ao uso e ocupação do solo. A área delimitada revela uma maior densidade nas bordas superior e inferior à esquerda, particularmente evidente nas imagens da Figura 3 (A e B). Nessa

região, a área experimental fica mais suscetível a uma série de processos climáticos e antrópicos, tais como precipitação pluviométrica, compactação do solo devido ao pisoteio de animais, exposição a processos erosivos, e o fenômeno conhecido como *splash*, causado pelo impacto das gotas de chuva. Além disso, essa área pode estar mais acessível a

atividade animal, o que pode resultar em um aumento na quantidade de massa por unidade de volume da amostra de solo. Esses fatores combinados contribuem para a observação de uma maior densidade de solo nas bordas superiores e inferiores à esquerda da área delimitada, como indicado nas imagens.

A diferença observada no gráfico da Figura 3 (B) pode ser atribuída a vários fatores presentes no solo. Devido à área não ser um experimento com um sistema padronizado, é possível que diferentes espécies ocupem o mesmo espaço amostrado. Uma hipótese para essa diferença é que o sistema radicular desenvolvido pela floresta, presente na área, pode contribuir para os diferentes níveis de compactação do solo. O tipo, a densidade e a distribuição dos sistemas radiculares das árvores e outras plantas podem influenciar diretamente a estrutura do solo, aumentando a coesão entre as partículas e, conseqüentemente, o adensamento do solo. Além disso, diferentes características do solo, como textura, teor de matéria orgânica e umidade, podem variar em diferentes áreas da amostra, o que também pode contribuir para as diferenças observadas nos níveis de compactação do solo.

Uma pesquisa realizada em uma área pertencente ao Centro de Pesquisa Eloy Gomes da Cooperativa Central Agropecuária de Desenvolvimento Tecnológico e Econômico Ltda (COODETEC), no período entre 1999 e 2001, pelo Núcleo de Inovações Tecnológicas (NIT), da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), buscou trabalhar em uma área experimental, analisando por meio de um mapa de contorno a situação em que se encontrava a área. A pesquisa feita mostrou a diferença entre as camadas do solo, apresentando variabilidade nas densidades medidas nas diferentes camadas do solo, como os mapas de contorno da Figura 3 (Mercante; Uribe-Opazo; Souza, 2003).

Battisti *et al.* (2020), ao realizar estudo sobre as características físicas do solo em quatro áreas diferentes, sendo, pastagem desprovida de árvores, sistema silvipastoril com núcleos arbóreos, floresta secundária e floresta primária, encontraram em seu estudo que a densidade do solo na floresta primária apresentou os menores valores quando comparada a outras três áreas, sendo elas, áreas de sistema silvipastoril com núcleos arbóreos, pastagem desprovida de árvores e floresta secundária. Com

isso podemos perceber que em locais sem ação antrópica, o solo apresenta melhor qualidade, com menor grau de compactação, favorecendo assim a infiltração e desenvolvimento de raízes.

No Brasil, poucos são os estudos relacionados com perdas de solo e água em sistemas florestais, criando-se uma lacuna nesta área do conhecimento. Em sistemas florestais nativos, Albuquerque, Lobardi Neto e Srinivasan (2001) quantificaram perdas de solo e água em Luvisolo Hipocrômico Órtico Vértico, com textura argilosa, após desmatamento da caatinga, e as compararam com a caatinga nativa. As perdas de solo e água na parcela desmatada foram de 61,7 t ha⁻¹ e 224,2 mm, respectivamente. De acordo com os autores, a parcela com caatinga nativa, quando comparada com a parcela descoberta, reduziu a perda de solo em cerca de 98 % e a perda de água em torno de 73 % (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007). Esse resultado torna clara a importância de estudos relacionados com a densidade do solo, uma vez que as perdas de solo, tanto em áreas agricultáveis quanto florestais necessitam de mapas espaciais que apresentem a situação atual do solo, não somente sobre a densidade, mas também outros parâmetros que exibam as condições físicas, químicas e biológicas afetadas pelo uso e ocupação do solo.

3.2 Resultado do cálculo de compactação do solo

A Tabela 2 apresenta os dados da compactação do solo nas diferentes profundidades de cada perímetro analisado.

De posse de tais dados, foram gerados os mapas de contorno (Figura 4) para as três camadas iniciais do solo (0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm).

Os dados de resistência à penetração (RP) do solo podem ser relacionados diretamente com a densidade do solo, uma vez que solos mais densos apresentam menor capacidade de infiltração de água. Como observado na Figura 4, conforme aumenta a profundidade, aumenta também a compactação, dificultando-se o crescimento de raízes. Segundo Thotakuri *et al.* (2024), as raízes da maioria das plantas podem atingir grandes profundidades, sendo necessária a realização de estudos das características do solo em profundidades elevadas buscando identificar a interferência das raízes no solo. Portanto, segundo Silva *et al.* (2020), conhecer a penetração do solo é

fundamental para verificar como as plantas podem ser afetadas, pois os solos com maior resistência a

penetração dificultam o crescimento das raízes.

Tabela 2 – Variações na compactação do solo em diferentes pontos e profundidades do perímetro florestal em MPa

Perímetro	Profundidades (cm)					
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60
10 10	1,42	1,92	1,63	1,87	1,98	1,97
10 20	0,99	1,35	1,63	2,4	2,24	2,06
10 30	0,87	1,28	1,72	1,67	1,53	1,8
20 10	1,05	1,56	1,71	2,05	1,94	2,28
20 20	0,87	1,24	1,63	2,21	1,8	2,29
20 30	0,89	1,36	1,41	1,79	2,09	2,7
30 10	0,81	1,12	1,71	1,71	1,59	1,82
30 20	0,85	1,22	1,56	1,94	1,88	2,57
30 30	0,9	1,34	1,65	2,08	2,35	2,92

Fonte: elaborada pelos autores.

Os pontos que apresentam menor compactação tendem a exibir menor resistência a penetração, uma vez que possuem uma maior porosidade e, conseqüentemente, um maior índice de vazios. A porosidade aumentada nessas áreas facilita a penetração de instrumentos como o penetrômetro, resultando em menor resistência detectada durante a avaliação. Em contrapartida, solos que foram compactados acidentalmente tendem a exibir maior resistência à penetração, devido à sua menor porosidade e à coesão mais pronunciada entre as partículas do solo. Essa redução na porosidade resulta em uma menor capacidade de movimentação de ar e água no solo, o que contribui para uma maior resistência percebida durante a penetração.

O fluxo de água no solo é reduzido à medida que o diâmetro dos poros diminui, enquanto o fluxo de gases é afetado pela diminuição do diâmetro dos poros e pelo aumento da saturação de água. O aumento da compactação do solo induz um rearranjo na estrutura do solo, resultando na anisotropia das funções dos poros (Horn, 2003). Este fenômeno significa que as características e propriedades dos poros do solo tornam-se diferentes em diferentes direções, devido à compactação desigual. Isso pode afetar significativamente a capacidade do solo para o transporte de água e ar, bem como para a troca de nutrientes e gases com as raízes das plantas.

Além disso, observou-se que nos perímetros de 20-30 cm e 30-30 cm, os valores de resistência à

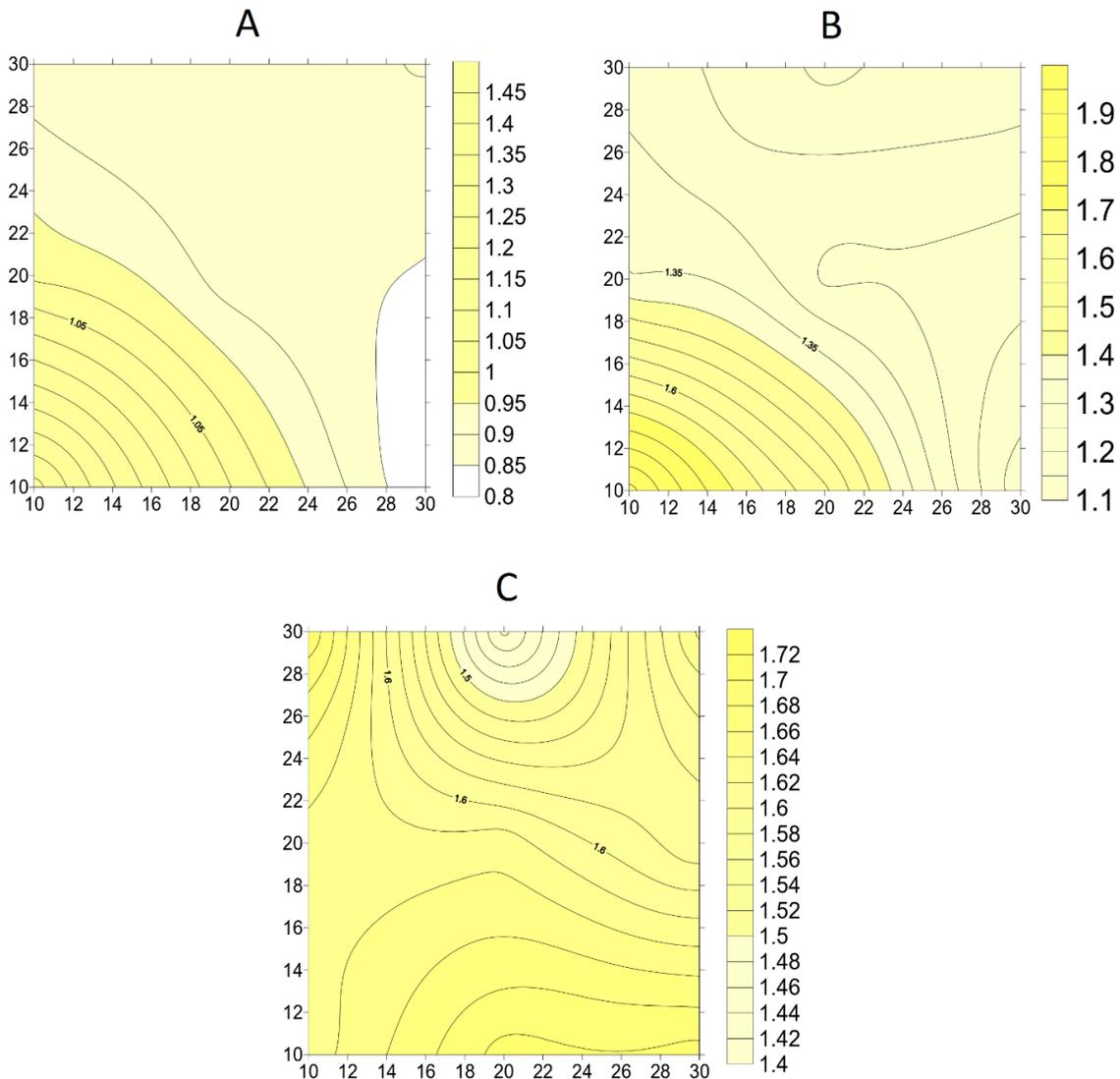
penetração estão acima dos níveis considerados limitantes para o desenvolvimento radicular, conforme reportado na literatura, que é de 2,5 MPa. Isso sugere que esse atributo pode estar atuando como uma barreira física para o crescimento radicular das espécies florestais, já que estudos anteriores indicam que valores de RP superiores a 2,5 MPa podem impedir o crescimento adequado das raízes, limitando o desenvolvimento das plantas (Dexter, 2004; Bengough *et al.*, 2006).

Espécies florestais possuem sistemas radiculares extensivos que precisam penetrar profundamente no solo para acessar água e nutrientes, especialmente em períodos de seca ou em solos com baixa fertilidade superficial. Quando confrontadas com altos valores de RP, essas plantas podem não conseguir desenvolver um sistema radicular eficiente, resultando em crescimento abaixo do nível ideal e maior suscetibilidade a estresses ambientais. Portanto, é fundamental considerar estratégias de manejo do solo que possam reduzir a compactação nos perímetros mencionados.

Além disso, monitoramentos periódicos da RP e de outros parâmetros do solo devem ser realizados para garantir que os níveis de compactação permaneçam dentro de limites aceitáveis para o crescimento saudável das plantas.

Na Figura 5 está apresentado o mapa de contorno das camadas mais profundas do solo (30-40 cm, 40-50 cm e 50-60 cm).

Figura 4 – Mapa de contorno da resistência a penetração radicular do perímetro da floresta com diferentes profundidades



(A) profundidade 0-10 cm, (B) profundidade 10-20 cm e (C) profundidade 20-30 cm
 Fonte: elaborada pelos autores.

Observa-se que a camada com o mais alto grau de compactação está localizada na profundidade de 50-60 cm do solo. Os efeitos adversos da compactação do solo sobre as plantas começam com a restrição do crescimento radicular, o que, por sua vez, afeta negativamente o desenvolvimento da parte aérea das plantas e sua produtividade. É importante ressaltar que o sistema radicular é frequentemente o primeiro componente da planta a sofrer os impactos da compactação do solo. Embora o solo possa apresentar uma qualidade química satisfatória, a compactação pode resultar em uma

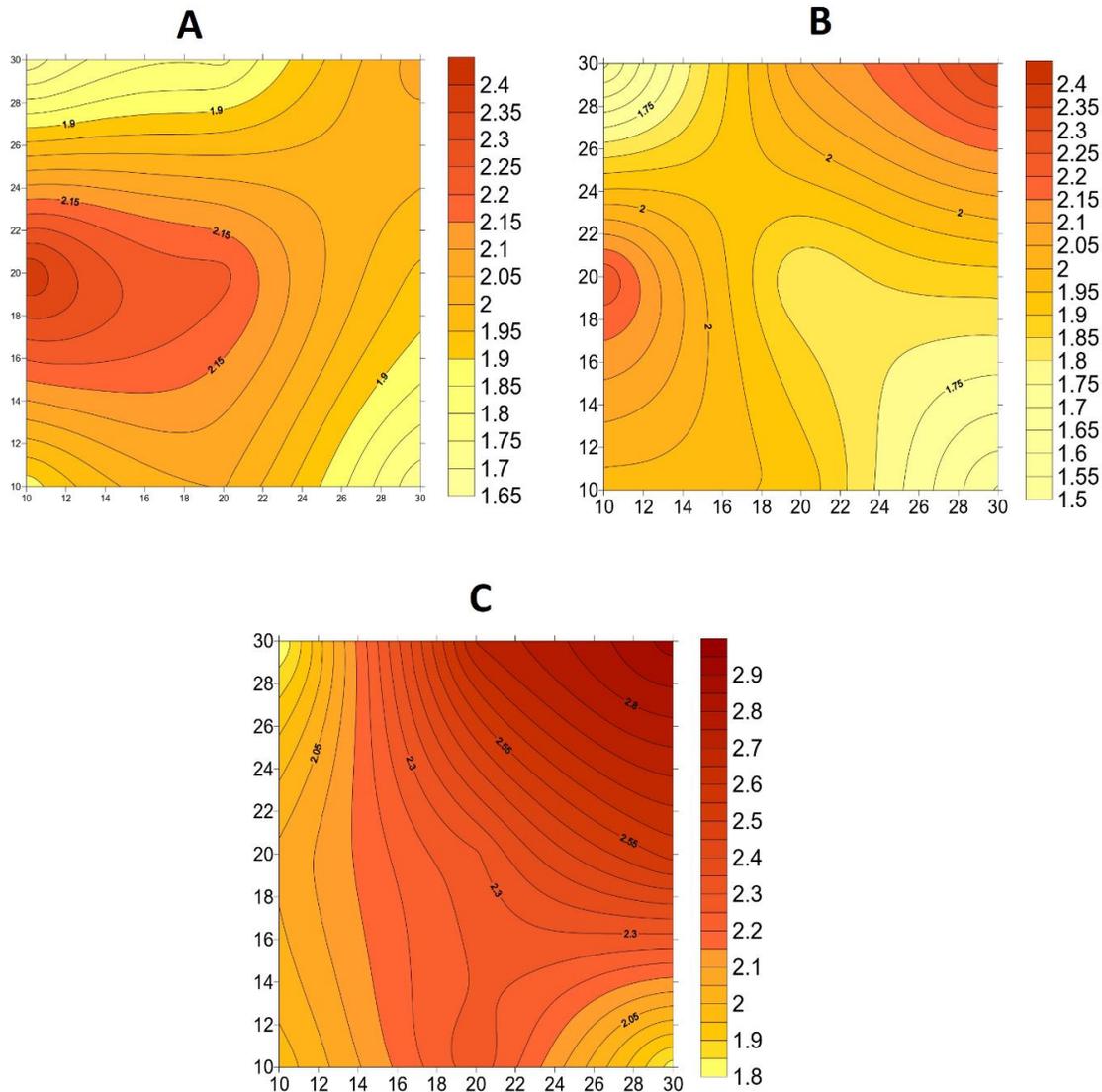
subutilização dos nutrientes disponíveis pelas plantas, uma vez que o desenvolvimento de novas raízes é prejudicado, e é nessas raízes que ocorre a maior taxa de absorção de nutrientes. Além disso, a compactação reduz os espaços vazios no solo, diminuindo assim a quantidade de oxigênio disponível na rizosfera, a região ao redor das raízes onde ocorre a absorção de nutrientes. Esses efeitos combinados podem levar a uma redução significativa na capacidade de crescimento e desenvolvimento das plantas, impactando diretamente a

produtividade agrícola e a saúde dos ecossistemas (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

O manejo do solo pode exercer influência significativa sobre a relação entre a massa e o volume do solo, o que, por sua vez, tem o potencial de afetar os fluxos de ar e água dentro do sistema

(Corcini *et al.*, 2007; Rosa *et al.*, 2007). Conforme o solo se torna mais compactado, a taxa de infiltração de água e o fluxo de gases podem ser reduzidos, levando à possibilidade de escoamento superficial e, conseqüentemente, desencadeando processos erosivos e o assoreamento de rios.

Figura 5 – Mapa de contorno da penetração do perímetro da floresta com diferentes profundidades



(A) profundidade 30-40 cm; (B) profundidade 40-50 cm e (C) profundidade 50-60 cm
 Fonte: elaborada pelos autores.

No caso do estudo em questão, que abrange uma área de floresta onde não há práticas de manejo do solo, é importante reconhecer que as influências externas podem ainda desempenhar um papel

significativo na alteração dos atributos físicos do solo, como a compactação. Apesar da ausência de intervenção direta no manejo, fatores como a atividade animal, pisoteio humano ocasional, ou até

mesmo eventos naturais como a queda de árvores, podem ocasionar compactação localizada do solo. Essas anomalias nos atributos físicos do solo podem ter implicações na estrutura e na função do ecossistema florestal, afetando processos como a infiltração de água, a disponibilidade de nutrientes e a regeneração da vegetação. Portanto, mesmo em ambientes onde não há práticas de manejo intencional, é crucial monitorar e compreender as

influências externas que possam afetar a saúde e a dinâmica do solo.

3.3 Resultado das análises de porosidade do solo

As porosidades médias das profundidades de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-30 cm do solo foram apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 – Percentual de variações na porosidade média do solo em diferentes profundidades do perímetro florestal

Profundidade (cm)	Porosidade (cm ³ .cm ⁻³)
0-10	0,68
10-20	0,61
20-30	0,71

Fonte: elaborada pelos autores.

Como observado na Tabela 3, o percentual de porosidade do solo se apresentam altos, com o solo com elevada porosidade a passagem de água é facilitada, assim contribuindo na infiltração de água no solo e conseqüentemente na recarga das águas subterrâneas (Brady; Weil, 2016).

Por ser uma área onde não ocorrem atividades antrópicas, é possível encontrar uma porosidade sem diferença significativa em seus resultados em quase todo o perfil de solo amostrado. A pouca diferença no valor da porosidade total na área de floresta nativa também foi encontrada por Araújo *et al.* (2022) que em seu estudo encontraram valores de porosidade de 0,68 cm³.cm⁻³, 0,61 cm³.cm⁻³ e 0,71 cm³.cm⁻³, para as camadas 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm, respectivamente.

Em condições de não perturbação por atividades que interfiram em seu ciclo ecológico, as florestas têm a capacidade intrínseca de manter a estrutura do solo em estado ideal, preservando sua porosidade e garantindo a funcionalidade e estabilidade dos ecossistemas florestais. Isso ocorre devido à interação complexa entre as comunidades bióticas e abióticas, incluindo microrganismos do solo, raízes das plantas, matéria orgânica em decomposição e processos físico-químicos. Esses elementos trabalham em conjunto para promover a formação e manutenção de agregados do solo, facilitando a aeração, a infiltração de água e a retenção de nutrientes, fundamentais para a saúde e a produtividade do ecossistema florestal. Além disso, a presença de uma cobertura vegetal densa ajuda a

proteger o solo contra a erosão causada pelo vento e pela água, contribuindo para a conservação de sua estrutura porosa e, conseqüentemente, para a sustentabilidade do ambiente florestal (Zuazo; Pleguezuelo, 2008).

Solos caracterizados por uma alta porosidade demonstram uma propensão inerente para facilitar a percolação e retenção de água em seu interior. Essa característica desempenha um papel fundamental na regulação do ciclo hidrológico do ecossistema, mitigando potenciais problemas associados à erosão do solo e minimizando perdas consideráveis de material superficial. A porosidade do solo influencia diretamente a taxa de infiltração de água, permitindo que a mesma penetre eficientemente no perfil do solo, contribuindo para a recarga de aquíferos e a manutenção de reservatórios subterrâneos. Ademais, a presença de uma rede porosa significativa proporciona uma capacidade de armazenamento hídrico que pode ser crucial durante períodos de estiagem, garantindo o fornecimento de água às plantas e mantendo a estabilidade do ecossistema. Esses benefícios evidenciam a importância da porosidade do solo na conservação dos recursos naturais e na promoção da sustentabilidade ambiental (Cecílio *et al.*, 2003; Shahidian *et al.*, 2017).

A densidade e a porosidade do solo são propriedades relacionadas com alterações no volume de solo, portanto, altamente relacionadas com a compactação do solo. A densidade apresenta relação inversa com a porosidade. Essa relação

entre densidade e porosidade é fundamental para entender a capacidade do solo de reter água, permitir a infiltração e circulação de ar, bem como para determinar a sua aptidão agrícola e a sustentabilidade do ecossistema. Geralmente, a redução da porosidade ocorre com os poros maiores (macroporos), responsáveis pela infiltração de água e aeração do solo. Poros maiores que 50 μm são considerados macroporos e são os primeiros a serem destruídos no processo de compactação (Reichert; Suzuki; Reinert, 2007).

Um trabalho realizado por Martins *et al.* (2003) compara uma área de floresta nativa com uma área de reflorestamento de eucalipto, onde as perdas de solo para o povoamento de eucalipto foram bem abaixo dos limites de tolerância para os solos

referentes a cada classe, indicando a adequação do manejo deste sistema de exploração no tocante à erosão hídrica. O fato de as perdas de solo para o eucalipto ficarem relativamente próximas daquelas da mata nativa indica a sustentabilidade daquele ambiente no contexto de erosão.

3.4 Resultado da estabilidade de agregados do solo

O índice de estabilidade de agregados foi estimado por meio da Equação 4 e os resultados médios são apresentados na Tabela 4.

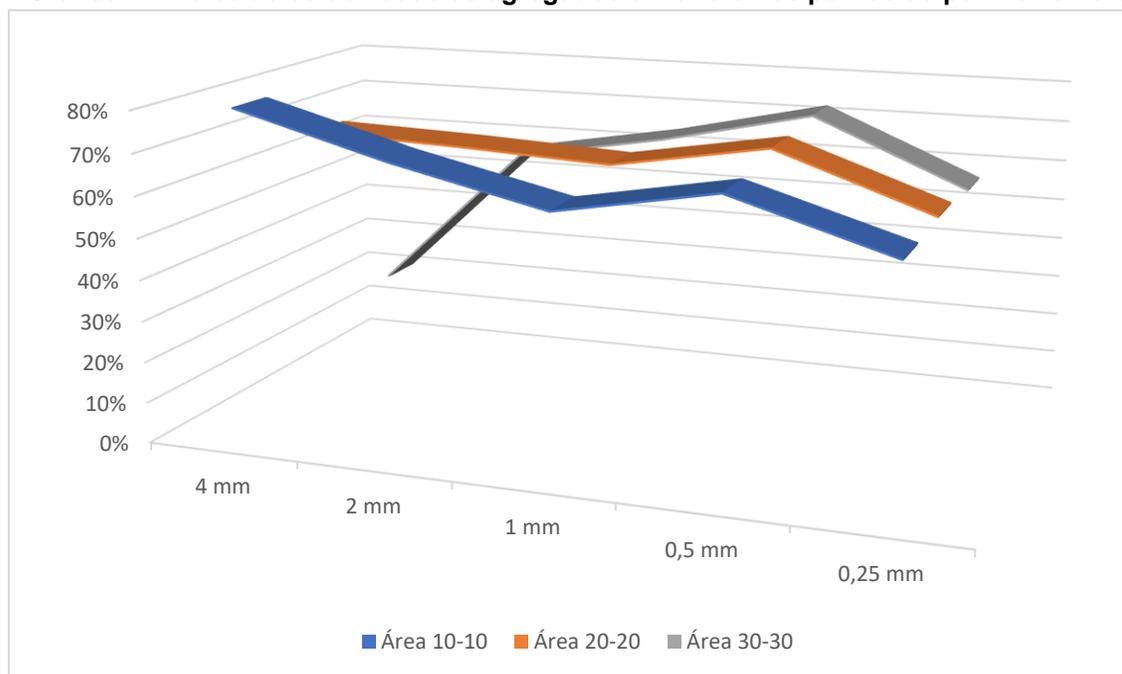
De posse de tais dados obteve-se o Gráfico 1 referente ao índice de estabilidade de agregados para cada área de coleta do solo.

Tabela 4 – Percentual de variações no Índice de estabilidade de agregados em diferentes pontos do perímetro florestal

Malha (mm)	Área 10-10	Área 20-20	Área 30-30
4	80%	68%	21%
2	70%	66%	57%
1	61%	65%	64%
0,5	68%	71%	72%
0,25	57%	58%	56%

Fonte: elaborada pelos autores.

Gráfico 1 - Índice de estabilidade de agregados em diferentes pontos do perímetro florestal



Fonte: elaborada pelos autores.

O índice de estabilidade de agregados é uma métrica fundamental na avaliação da agregação do solo, expressa em uma escala percentual que varia de 0 a 100%. No entanto, neste estudo, o valor do IEA não atingiu 100% devido à perda de amostra de solo durante o processo de agitação. Isso ocorre porque a fração argilosa, composta por agregados finos, passa pela última peneira utilizada, que possui uma malha de 0,25 mm.

Como resultado, alguns agregados do solo conseguem atravessar essa peneira, sendo, portanto, excluídos do cálculo do índice. Este índice é sensível à presença de agregados com diâmetro inferior a 106 mm, uma vez que uma maior quantidade desses agregados indica uma menor estabilidade do solo. Na área denominada 30-30 cm, observou-se o maior valor da massa de agregados menor que 106 mm ($w_{p0,106}$), indicando uma maior proporção de agregados com tamanho abaixo de 106 mm. Consequentemente, o IEA foi reduzido nesta área em comparação com as outras, refletindo uma menor estabilidade dos agregados do solo em questão. Este achado sugere uma possível fragilidade da estrutura do solo na área 30-30 cm, o que pode ter implicações significativas para suas propriedades físicas e químicas, bem como para a produtividade e sustentabilidade do ecossistema associado.

Adicionalmente, a análise do Gráfico 1 permitiu observar que, com exceção da primeira peneira, as demais mantiveram um padrão consistente de estabilidade, exibindo percentuais de agregados do solo próximos entre si. Este comportamento sugere uma uniformidade na distribuição dos agregados do solo ao longo das diferentes faixas granulométricas analisadas, indicando uma estabilidade relativa desses agregados em relação ao tamanho das partículas. Tal uniformidade na distribuição dos agregados pode ser interpretada como um indicador da homogeneidade da estrutura do solo em termos de sua estabilidade em diferentes escalas granulométricas, o que pode ter implicações importantes para processos como a infiltração de água, a circulação de ar e a disponibilidade de nutrientes no solo. A estabilidade dos agregados diminui significativamente com a diminuição da cobertura do solo, mas como o local de estudo não sofre esse problema, é notória a grande elevação de agregados encontrada no estudo.

Além disso, na área de floresta avaliada, a estabilidade de agregados foi menor, quanto maior a profundidade avaliada (250 mm). Estes resultados podem ser encontrados em estudos como os de Vasconcelos *et al.* (2010) e Alho *et al.* (2014), que observaram na agregação do solo uma diminuição com o aumento da profundidade em solo sob mata nativa. Wendling *et al.* (2012), avaliando quatro diferentes manejos de solo, encontraram em seu estudo que a área de floresta nativa apresentou os maiores índices de estabilidade de agregados, quando comparados a áreas de *pinus*, pastagem e semeadura direta.

Portanto, a análise da estabilidade dos agregados fornece informações valiosas sobre a capacidade do solo em sustentar esses processos hidrológicos e em resistir à degradação causada pela erosão. Essa compreensão detalhada da relação entre estabilidade de agregados e qualidade da estrutura do solo é essencial para o desenvolvimento de práticas de manejo adequadas, que promovam a conservação e a sustentabilidade dos recursos naturais do solo.

4 CONCLUSÃO

Em síntese, os resultados deste estudo destacam a importância crítica dos remanescentes florestais na conservação das propriedades físicas do solo. A análise detalhada das características como densidade, porosidade, índice de compactação e estabilidade de agregados, revelou que áreas de floresta em estágio avançado de sucessão ecológica sustentam condições ideais para o desenvolvimento sustentável dos ecossistemas. A menor densidade do solo e a maior porosidade encontradas são indicativos de uma estrutura favorável à infiltração de água e ao crescimento vegetal, essenciais para a manutenção da qualidade ambiental.

Conclui-se, então, que a preservação e o manejo adequado desses *habitats* naturais são fundamentais para garantir a resiliência e a saúde dos solos, promovendo um ambiente propício à biodiversidade e ao equilíbrio ecológico a longo prazo.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, A. W.; LOMBARDI NETO, F.; SRINIVASAN, V.S. Efeito do desmatamento da

caatinga sobre as perdas de solo e água de um Luvissole em Sumé (PB). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 121-128, 2001. Disponível em:

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100013>. Acesso em: 18 mar. 2024.

ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P. da; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. de. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 44, n. 3, p. 246–254, jul./set. 2014.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 187-206, jan./abr. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5777/PAeT.V5.N1.12>. Acesso em: 12 mar. 2024.

ARAUJO, W. O.; ALVARES, A. E. S.; EMERICK, H. F.; CRUZ, S. N.; OLIVEIRA, M. V.; SILVA, C. D. T.; ALMEIDA, W. S.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A. Impactos na variabilidade espacial da densidade e porosidade do solo em função da transformação de floresta em pastagem no Vale do Jamari, Rondônia. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i15.37170>. Acesso em: 12 mar. 2024.

BATTISTI, L. F. Z.; FILHO, A. L. S.; LOSS, A.; FARLEY, J. Atributos físicos do solo em um sistema silvipastoril com núcleos arbóreos no estado de Santa Catarina. **Holos**, Natal, v. 6, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2020.9473>. Acesso em: 18 mar. 2024.

BENGOUGH, A. G.; MCKENZIE, B. M.; HALLETT, P. D.; VALENTINE, T. A. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 329-342, 2006. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq350>.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 15th ed. New York: Pearson Global Edition, 2016.

BROOKES, P.C. The use of microbial parameters in soil pollution by heavy metals. **Biology and Fertility of Soils**, v. 19, p. 269-279, Mar. 1995.

CECÍLIO, R. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A. Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green-Ampt. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, p. 415-422, dez. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662003000300002>. Acesso em: 21 fev. 2024.

CORCINI, A. L. M.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; ROMERO, R. D.; GALLARETTA, C. G.; PREVEDELLO, J. Fluxo de água e ar do solo em sistemas de cultivo de cebola em solos vérticos no Uruguai. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31, 2007, Gramado, RS. Gramado: SBCS, 2007.

DAMIBA, W. A. F.; GATHENYA, J. M.; RAUDE, J. M.; CASA, P. G. Soil quality index (SQI) for evaluating the sustainability status of Kakia-Esamburmbur catchment under three different land use types in Narok County, Kenya. **Heliyon**, v. 10, n. 2, Feb. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25611>. Acesso em: 17 mar. 2024.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, Jun. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.004>. Acesso em: 18 fev. 2024.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. *In*: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, p. 3-21, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c1>. Acesso em: 18 mar. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Geoinfo** - Infraestrutura de dados espaciais da Embrapa. 2021. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/>. Acesso em: 18 mai. 2024.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1099–1108, out. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500025>. Acesso em: 18 mai. 2024.

B. GRIZZETTI, D. LANZANOVA, C. LIQUETE, A. REYNAUD, A.C. CARDOSO, Assessing water ecosystem services for water resource management. **Environmental Science & Policy**, v. 61, p. 194-203, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.008>.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, n. 2, p.121-145, Jun. 2005.

HORN, R. Stress- strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. **Geoderma**, v. 116, p.77-88, Sep. 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00095-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00095-8). Acesso em: 18 mar. 2024.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, Columbus, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, May. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su7055875>. Acesso em: 27 fev. 2024.

LIN, L.; ZHAO, S. H.; LI, L.; ZHANG, C.; WANG, E. Influence of soil physical and chemical properties on mechanical characteristics under different cultivation durations with Mollisols, **Soil and Tillage Research**, v. 224, Oct. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105520>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: BADEP/UFPR/IBPT, 1981.

MARINS, D. S.; LORDELO, L. M. K. Análise das áreas ambientalmente protegidas na bacia do rio Capivari em Cruz das Almas – BA, a partir da utilização dos dados do CEFIR. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 11, n. 2, dez. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.9771/gesta.v0i2.54970>. Acesso em: 18 mar. 2024.

MARTINS, S. G.; SILVA, M. L. N.; CURTI, N.; FERREIRA, M. M.; FONSECA, S.; MARQUES, J. J. G. S. M. Perdas de solo e água por erosão hídrica em sistemas florestais na região de Aracruz (ES). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, jun. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000300001>. Acesso em: 25 mar. 2024.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 6, p. 1149-1159, dez. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600019>. Acesso em: 18 mar. 2024.

OLIVEIRA-ANDREOLI, E. Z.; MORAES, M. C. P.; FAUSTINO, A. S.; VASCONCELOS, A. F.; COSTA, C. W.; MOSCHINI, L. E.; MELANDA, E. A.; JUSTINO, E. A.; LOLLO, J. A.; LORANDI, R. Multi-temporal analysis of land use land cover interference in Environmental Fragility in a Mesozoic basin, southeastern Brazil. **Groundwater for Sustainable Development**, Amsterdam, v. 12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100536>. Acesso em: 22 fev. 2024.

PIMENTEL, D.; HARVEY, C.; RESOSUDARMO, P.; SINCLAIR, K.; KURZ, D.; MCNAIR, M.; BLAIR, R. Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits. **Science**, New York, v. 267 (5201), p. 1117-1123, Feb. 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1126/science.267.5201.1117>. Acesso em: 26 fev. 2024.

REICHERT J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J.. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 5, n. 1, p. 49-134, jan. 2007. Disponível em: https://fiscadosolo.ccr.ufsm.whoos.com.br/downloads/Producao_Artigos/2007_Topicos.pdf. Acesso em: 18 mar. 2024.

ROSA, D. P. **Comportamento dinâmico e mecânico do solo sob níveis diferenciados de escarificação e compactação**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

SHAHIDIAN, S.; GUIMARÃES, R. C.; RODRIGUES, C. M.; CHAMBEL, A.; BASCH, G.; ANDRADE, J. A.; SANTOS, F. L.; ALEXANDRE, C. A. & COELHO, R. Relações Solo-Água-Planta. In: SHAHIDIAN, S.; GUIMARÃES, R. C.; RODRIGUES, C. M. (Eds.). **Hidrologia Agrícola**. 2. ed. Évora, PT: ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Escola de Ciência e Tecnologia da Universidade de Évora, p. 155-213, 2017.

SILVA, M. O.; SANTOS, M. P.; SOUZA, A. C. P.; SILVA, R. L. V.; MOURA, I. A. A.; SILVA, R. S.; COSTA, K. D. S. Soil quality: biological indicators for sustainable management. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853-6875, Jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-463>. Acesso em: 03 mar. 2024.

SILVA, M. O.; VELOSO, C. L.; NASCIMENTO, D. L.; OLIVEIRA, J.; PEREIRA, D. F.; COSTA, K. D. S. Chemical and physical indicators of soil quality. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, Jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n7-431>. Acesso em: 15 mar. 2024.

SMITH, J.; BROWN, L. Determination of soil bulk density. In: METHODS OF SOIL ANALYSIS. Soil Science Society of America, 2020. p. 123-130.

STOLF R.; MURAKAMI, J. H.; BRUGNARO, C.; SILVA, L. G.; SILVA, L. C. F.; MARGARIDO, L. A. C. Penetrômetro de impacto stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 38, n. 3, p. 774-782, jun. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300009>. Acesso em: 28 jun. 2024.

THOTAKURI, G.; CHAKRABORTU, P.; SINGH, J.; XU, S.; KOVÁCS, P.; IQBAL, J.; KUMAR, S. X-ray computed tomography – Measured pore characteristics and hydro-physical properties of soil profile as influenced by long-term tillage and rotation systems. *Catena*, v. 237, Jan. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107801>. Acesso em: 17 mar. 2024.

VASCONCELOS, R. F. B.; CANTALICE, J. R. B.; OLIVEIRA, V. S.; COSTA, Y. D. J.; CAVALCANTE, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 34, n. 2, p. 309-316, abr. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000200004>. Acesso em: 25 fev. 2024.

YODER, R. E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 28, n. 5, p. 337-351, 1936. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>. Acesso em: 12 mar. 2024.

WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 1st ed. John Wiley & Sons, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470517277>. Acesso em: 17 fev. 2024.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do Cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, p. 256-265, mar. 2012, Suplemento 1 – XXXIII Congresso Brasileiro de

Ciência do Solo. Disponível em:
<https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/13277/8371>. Acesso em: 22 mar. 2024.

ZUAZO V. H. D.; PLEGUEZUELO C. R. R. Soil-
erosion and runoff prevention by plant covers.

Agronomy for Sustainable Development, v. 28,
n. 1, p. 65-86, Mar. 2008. Disponível em:
<https://doi.org/10.1051/agro:2007062>. Acesso em:
18 mar. 2024.