

METAIS PESADOS E EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM ORGANOSSOLO CULTIVADO
POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN CULTIVATED ORGANOSSOLO
ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS Y EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN ORGANOSSOLO CULTIVADO

Rafael Cipriano da Silva^{1*} ; **Marcos Gervasio Pereira²** 

¹Doutor em Agronomia pela Escola Superior de Agronomia Luiz de Queiroz/Universidade de São Paulo (Esalq/USP). Pesquisador da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme), Fortaleza, Ceará, Brasil; ²Doutor em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ). Professor Titular do Departamento de Solos da UFRRJ, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

*Autor correspondente: ciprorafael@gmail.com.

Recebido: 10/08/2025 | **Aprovado:** 25/08/2025 | **Publicado:** 06/09/2025

Resumo: Organossolos têm grande importância nos agroecossistemas, especialmente no Rio de Janeiro, onde estão sob intensa pressão antrópica. Este estudo avaliou propriedades químicas e a emissão de gases de efeito estufa em diferentes profundidades de um Organossolo sob uso agrícola, localizado em Santa Cruz, zona rural do Rio de Janeiro. Amostras foram coletadas nas camadas de 0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm para análise de pH, cátions trocáveis (Ca, Mg, K, Na, Al e H), P assimilável, soma e saturação por bases, CTC, teores e estoque de carbono. Também foram determinados teores de elementos potencialmente tóxicos (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn e Fe), além da emissão de N₂O e CO₂ em estações distintas (verão e inverno), com coletas por quatro dias em cada época. Em superfície, os elevados teores de Ca, K e P foram associados à adubação e calagem. A redução de carbono e matéria orgânica até 20 cm decorreu da drenagem e mecanização. Teores de Cd, Cu e Pb ultrapassaram valores de intervenção, atribuídos ao uso recorrente de insumos agrícolas. As emissões de N₂O variaram entre estações, influenciadas pelo clima e umidade do solo. As emissões de CO₂ foram maiores no inverno, com pico de 1,9 kg C-CO₂ m⁻² h⁻¹.

Palavras-chave: Metais pesados. Ambiente de várzea. Matéria orgânica.

Abstract: Organossolos play an important role in agroecosystems, especially in Rio de Janeiro, where they are under intense anthropogenic pressure. This study evaluated the chemical properties and greenhouse gas emissions at different depths of a Organossolo under agricultural use, located in Santa Cruz, a rural area of Rio de Janeiro. Samples were collected at depths of 0–10, 10–20, 20–30, and 30–40 cm to analyze pH, exchangeable cations (Ca, Mg, K, Na, Al, and H), available P, base sum and saturation, cation exchange capacity (CEC), carbon content, and stock. Concentrations of potentially toxic elements (Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, and Fe) were also determined. N₂O and CO₂ emissions were measured during two distinct seasons (summer and winter), with sampling conducted over four days in each season. At the surface, high levels of Ca, K, and P were associated with fertilization and liming practices. The decrease in carbon and organic matter up to 20 cm was attributed to drainage and mechanized agricultural practices. Cd, Cu, and Pb levels exceeded intervention thresholds, likely due to the recurrent use of agricultural inputs. N₂O emissions varied between seasons, influenced mainly by climate and soil moisture. CO₂ emissions were higher in winter, peaking at 1.9 kg C-CO₂ m⁻² h⁻¹.

Keywords: Heavy Metals. Floodplain environment. Organic matter.

Resumen: Los Organossolos tienen una gran importancia en los agroecosistemas, especialmente en Río de Janeiro, donde están bajo intensa presión antrópica. Este estudio evaluó las propiedades químicas y las emisiones de gases de efecto invernadero a diferentes profundidades de un Organossolo en uso agrícola, ubicado en Santa Cruz, zona rural de Río de Janeiro. Se recolectaron muestras a profundidades de 0–10, 10–20, 20–30 y 30–40 cm para analizar el pH, cationes intercambiables (Ca, Mg, K, Na, Al y H), fósforo asimilable, suma y saturación de bases, capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido y reserva de carbono. También se determinaron concentraciones de elementos potencialmente tóxicos

(Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn y Fe). Las emisiones de N₂O y CO₂ se midieron en dos estaciones distintas (verano e invierno), con muestreos durante cuatro días en cada época. En la superficie, los altos niveles de Ca, K y P se asociaron con prácticas de fertilización y enclado. La reducción del carbono y la materia orgánica hasta los 20 cm se atribuyó al drenaje y a la mecanización agrícola. Los niveles de Cd, Cu y Pb superaron los valores de intervención, probablemente debido al uso recurrente de insumos agrícolas. Las emisiones de N₂O variaron entre estaciones, influenciadas principalmente por el clima y la humedad del suelo. Las emisiones de CO₂ fueron mayores en invierno, con un pico de 1,9 kg C-CO₂ m⁻² h⁻¹.

Palabras-clave: Metales Pesados. Ambiente de llanura de inundación. Materia orgánica.

1 Introdução

No Brasil, os solos classificados como Organossolos, ou com a presença de horizontes hísticos, ocorrem predominantemente em ambientes de várzeas, geralmente associados a outros solos hidromórficos, como os Gleissolos (Santos *et al.*, 2018). A área ocupada por Organossolos é estimada em aproximadamente 7.890 km², correspondendo a 0,09% do território nacional (Canto *et al.*, 2020). Apesar de sua limitada extensão geográfica, esses solos apresentam relevante importância ambiental, econômica e social, especialmente para a agricultura, o que os torna suscetíveis ao uso agrícola intensivo (Ebeling *et al.*, 2013; Canto *et al.*, 2020).

No estado do Rio de Janeiro (RJ), as maiores extensões de solos orgânicos são encontradas nos municípios de Campos dos Goytacazes, Quissamã, Silva Jardim, Macaé, Resende e, particularmente, no município do Rio de Janeiro, com destaque para as regiões de Jacarepaguá e Santa Cruz (Ebeling *et al.*, 2013).

Nessas áreas periurbanas, o manejo agrícola tende a ser mais intensivo, frequentemente realizado por agricultores urbanos ou familiares e com baixa adoção de práticas conservacionistas. Isso pode resultar em maior profundidade de drenagem, revolvimento do solo e uso contínuo de insumos assim como o uso intensivo do solo, com consequências mais pronunciadas sobre a degradação do solo e subsidência (Cipriano-Silva *et al.*, 2014; Santos *et al.*, 2020). Atrelada a esta questão, o manejo intensivo e drenagem de Organossolos favorecem o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Gandois *et al.*, 2020).

Como grande parte das áreas de Organossolos no estado do Rio de Janeiro é explorada por agricultores urbanos, a caracterização e o monitoramento das alterações ambientais decorrentes da ação antrópica são fundamentais para diagnosticar os impactos do manejo sobre os recursos naturais, especialmente os solos (Santos *et al.*, 2020). Nesse contexto, determinados parâmetros edáficos podem fornecer informações relevantes sobre as interações entre a atividade agrícola e o meio ambiente. Dentre eles, destaca-se o teor de elementos potencialmente tóxicos (EPTs). No entanto, ainda são escassos os estudos sobre o comportamento dos EPTs em Organossolos, especialmente devido às complexas interações com os componentes do ambiente. Adicionalmente, a quantificação da emissão de gases de efeito estufa (GEE) constitui outro aspecto essencial para avaliar os impactos da ação antrópica nesses ecossistemas (Soares *et al.*, 2015).

Neste estudo, optou-se pela região de Santa Cruz, no município do Rio de Janeiro, por representar um cenário emblemático de uso intensivo de Organossolos em área periurbana, onde há convivência entre agricultura familiar, expansão urbana desordenada e fragilidade ambiental. A região apresenta histórico de uso agrícola consolidado, em contraste com pressões urbanas crescentes, configurando um ambiente ideal para analisar os impactos do manejo sobre a qualidade do solo e as emissões de GEE.

Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar as características químicas de um Organossolo sob uso agrícola, visando elucidar os efeitos do manejo sobre suas propriedades e na emissão de GEE. Espera-se, assim, contribuir para o desenvolvimento de ferramentas de planejamento territorial capazes de mitigar os problemas decorrentes da expansão e ocupação desordenadas do solo.

2 Material e métodos

A área em estudo está localizada na zona rural de Santa Cruz, na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro (fuso 23; N 632546, E 7468991). O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.*, 2013), com temperatura anual média de 24,7°C, umidade relativa acima de 60% ao longo do ano e com precipitações variando de 1.000 a 2.230 mm anuais. A vegetação nativa típica da região é de floresta tropical de várzea e floresta tropical subperenifolia, em sua grande parte degradadas. A área está integrada à periferia da Baixada de Sepetiba e cuja bacia hidrográfica é constituída pelos rios Guandu Açú, Itaguaí, além de pequenos outros que desembocam na Baía de Sepetiba.

Esta área é uma das poucas regiões do município do RJ onde os solos orgânicos possuem uso agrícola, com o plantio de mandioca (*Manihot esculenta*), de quiabo (*Abelmoschus esculentus*) e de coco (*Cocos nucifera* L.). Os canais de drenagem possuem 80 cm de profundidade e as lavouras são manejadas de forma convencional, com aplicação de calcário, fertilizantes sintéticos e mecanização com uso de arado e grade para cultivo (Soares *et al.*, 2015a). O plantio da mandioca é feito em camalhões para reduzir a influência do lençol freático no desenvolvimento das raízes e facilitar o manejo.

Para a caracterização de atributos químicos do solo foram selecionados três pontos, aleatoriamente, com cerca de 15 m de distância entre eles, nas quais foram coletadas amostras simples e deformadas de solo nos intervalos de 0-10, 10-20, 20-30 e 30-40 cm, obtendo-se assim três repetições para cada profundidade. Depois de coletadas, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 2mm para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Para as análises do solo foi empregada a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017), amplamente empregadas para a caracterização de solos. Foram determinados os valores de pH em água deionizada, em solução de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} e em KCl 1 mol L^{-1} , todos na relação solo solução de 1:2,5 (v/v). Foram determinados os teores de bases trocáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ e Na^+), Al^{+3} trocável, acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}^{+3}$) e o P disponível. Foram calculados os valores de soma de bases ($S = \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^+ + \text{Na}^+$) e capacidade de troca catiônica ($\text{CTC} = S + \text{H} + \text{Al}^{+3}$).

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados pela metodologia proposta por Tedesco *et al.* (1995), por oxidação via úmida com uso de dicromato de potássio. A estimativa do estoque de C foi feita a partir dos teores de C nas diferentes profundidades, para as respectivas Ds, utilizando a equação (Eq.1):

$$EstC = \frac{(C \times D_s \times E)}{10} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: EstC é o estoque de COT (Mg ha⁻¹); C: teor de C orgânico na camada avaliada (g kg⁻¹); D_s é a densidade do solo (Mg m⁻³) e E é a espessura (cm) da camada em análise.

Para a determinação dos teores de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) foi adotada a metodologia padrão que consta da ISO 11466 (ISO, 1995), com uso de solução de ácido nítrico + ácido clorídrico (1:3 v/v). Nos extratos foram determinadas as concentrações de Cd, Cr Cu, Zn, Mn, Ni, Fe e Pb, em espectrofotômetro de absorção atômica, modelo AA55B.

Para a coleta e análise da emissão de N₂O foram realizadas duas coletas, cada uma com 4 dias de coletas, e em estações distintas: a primeira no verão e a segunda no inverno. Foram utilizadas seis câmaras, que consistem em caixas de metal de 0,30 x 0,25 m, inseridas no solo até a profundidade de 0,05 m. O espaçamento entre as câmaras foi de aproximadamente de 2 m, acondicionadas nas entrelinhas do plantio de mandioca, conservando a cobertura vegetal do solo (resíduos culturais e plantas espontâneas). As coletas de N₂O e análise foram feitas de acordo com Alves *et al.* (2017), a determinação foi realizada por cromatografia gasosa com detector de captura de elétrons e os resultados expressos em µg N-N₂O m⁻² h⁻¹. Para a quantificação da emissão do CO₂, foi utilizado o aparelho EGM4, que fornece medições diretas do fluxo de CO₂ em kg C-CO₂.

3 Resultados e discussão

3.1 Complexo sortivo e carbono orgânico do solo

Os valores de pH do solo são baixos, independente da solução usada, variando de 4,81 a 3,83 (Tabela 1). Em média, os valores de pH em água são maiores e os valores em KCl menores, com variação média de 0,9. Esta diferença é atribuída ao efeito da solução de KCl, por possuir maior concentração de íons K⁺, induzindo a liberação de íons H⁺ e Al³⁺ retidos nos coloides para a solução, com conseqüente aumento da acidez (Santos *et al.*, 2020). Dessa forma, o pH em KCl torna-se mais sujeito a interferência pelo elevado teor de moléculas orgânicas de radicais carboxílicos e fenólicos oriundos da MO.

Tabela 1 - Atributos químicos de um Organossolo em diferentes profundidades.

Prof ¹ cm	pH			Al	H+Al	Ca	Mg	K	Na	S ²	CTC ³	V ⁴ %	P mg kg ⁻¹
	H ₂ O	CaCl ₂	KCl										
0-10	4,81	4,12	3,86	1,5	32,9	19	7	3,0	0,2	29,4	62,4	47	17,6
10-20	4,80	4,10	3,86	1,5	32,4	20	6	1,1	0,2	27,5	59,9	46	15,3

20-30	4,70	4,10	3,84	1,5	32,4	21	3	0,8	0,3	25,7	58,0	44	15,2
30-40	4,79	4,07	3,83	1,8	33,5	16	11	0,8	0,3	27,5	61,0	45	14,1

¹Prof: profundidade. ²S: Soma de bases. ³CTC: Capacidade de troca de cátions. ⁴V: Saturação de bases.

Os valores de pH determinados em CaCl₂ são, em média, 0,6 unidade inferiores aos obtidos em água, tendendo a apresentar resultados intermediários. Essa metodologia é considerada mais precisa para avaliação da acidez ativa, especialmente em solos com alta concentração de compostos orgânicos (Raij *et al.*, 2001). De acordo com Raij *et al.* (2001) consideram que, para Organossolos, os índices de pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ são cerca de 0,5 unidade menores em relação ao pH em água.

A elevada acidez e aumento dos valores de H⁺/Al observados são decorrentes do predomínio do íon H⁺ no complexo sortivo, tanto devido à presença de material sulfídrico quanto à ionização de ácidos orgânicos. Considerando o caráter tiomórfico presente no solo, é possível que em profundidades superiores às analisadas os valores de pH sejam ainda menores, em função da oxidação do material sulfídrico, com formação de sulfatos e, posteriormente, de ácido sulfúrico, o que pode provocar uma acentuada queda no pH (Santos *et al.*, 2020; Santos *et al.*, 2018).

Como consequência da acidez elevada, os teores de alumínio trocável (Al³⁺) também são altos, alcançando até 1,8 cmol_c kg⁻¹ na camada de 30–40 cm. No entanto, é importante destacar que métodos analíticos empregados podem superestimar os teores de Al em solos com elevados teores de MO (Campos *et al.*, 2014; Pereira *et al.*, 2020a). Este comportamento, com elevada acidez e incremento dos teores de H e Al associados aos teores elevados de MO, também foi observado em outros Organossolos (Cipriano-Silva *et al.*, 2014; Bispo *et al.*, 2015; Pereira *et al.*, 2020a).

Apesar da aplicação recorrente de calcário na área, a amplitude das alterações nos valores de pH e de Al é reduzida nas camadas superficiais, diretamente afetadas pela calagem, em comparação com as subsuperficiais. Esse comportamento reflete a elevada capacidade de tamponamento desses solos, atribuída ao alto teor de matéria orgânica (Pereira *et al.*, 2020b). Em relação às bases trocáveis, observam-se níveis elevados de Ca e Mg, principalmente em superfície, com decréscimo de Ca e aumento de Mg em profundidade (30-40 cm). O teor elevado de Ca em superfície pode ser atribuído à calagem, enquanto o aumento de Mg nas camadas mais profundas à influência fluvio-marinha.

O potássio trocável (K) apresenta teores elevados na superfície (3,0 cmol_c kg⁻¹) com redução progressiva até 0,8 cmol_c kg⁻¹ aos 40 cm de profundidade. Esse padrão está associado à aplicação superficial de fertilizantes potássicos. Além disso, a presença de Ca e Mg, disponibilizados pela calagem, pode favorecer a mobilização do K⁺ por fluxo de massa, aumentando sua disponibilidade na solução do solo e, conseqüentemente, sua suscetibilidade à lixiviação (Pereira *et al.*, 2020b).

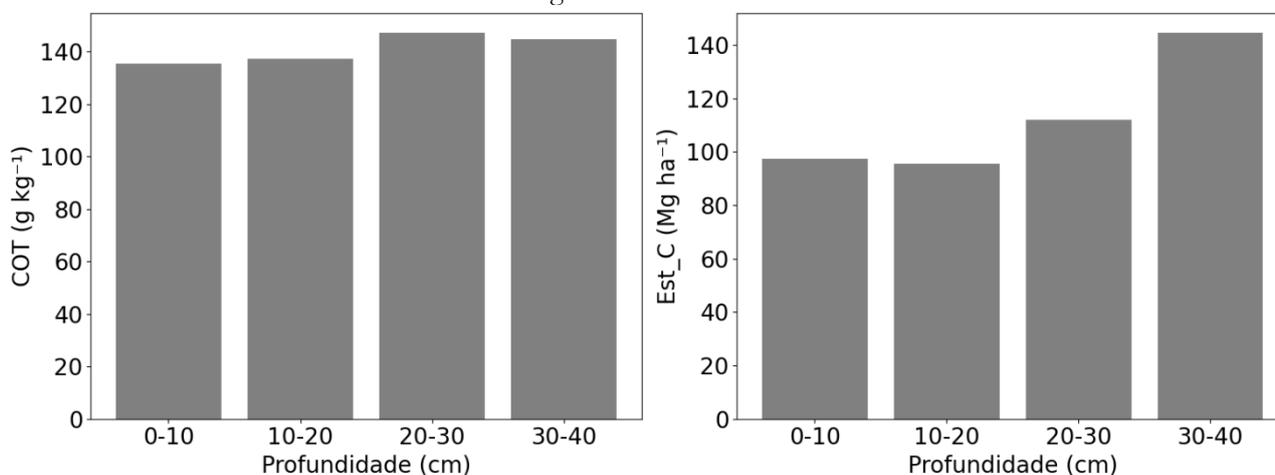
Os teores de fósforo (P) também são elevados, atribuídos às adubações fosfatadas realizadas para o cultivo e à baixa mobilidade do elemento no perfil do solo, em comparação com o K. Estudos realizados por Pereira *et al.*

al. (2020b), demonstraram que a calagem pode reduzir os teores de P no solo, em razão da formação de fosfato tricálcico (Ca_3PO_4)², menos disponível às plantas. Embora os teores de sódio trocável (Na) tenham se mostrado elevados, permanecem abaixo dos limites que conferiram ao solo um caráter solódico (Santos *et al.*, 2018). A presença de Na está relacionada à influência do lençol freático e à natureza fluviomarinha da região, inserida na planície da Baixada de Sepetiba.

Comparado a outros estudos relatando a caracterização química de Organossolos (Pereira *et al.*, 2020a; Santos *et al.*, 2020), os teores de S são elevados, resultado tanto das adubações quanto da calagem. Apesar disso, os altos valores de capacidade de CTC, influenciados principalmente pelos teores de H+Al, resultam em valores de V% menores que 50%, mesmo após a calagem, conforme observado em outros estudos (Pereira *et al.*, 2020b; Santos *et al.*, 2020). Por essa razão, não é aconselhável utilizar o V% como principal parâmetro para avaliar a fertilidade em Organossolos.

Os teores de COT variaram de 135,3 a 147,3 g kg⁻¹, com tendência de aumento em profundidade (Figura 1A). Esse efeito é decorrente da drenagem que, associada à aração, promovem a aeração das camadas superficiais do solo, estimulando a atividade microbiana e subsequente decomposição da MO (Santos *et al.*, 2020). A partir dos teores de COT no solo foi determinado o estoque de C, cujos valores variam de 95,7 a 112,1 Mg ha⁻¹, tendendo a aumentar em profundidade, seguindo o mesmo padrão dos teores de COT (Figura 1A). Até 20 cm os teores de Est_C são baixos em comparação à camada mais profunda (30-40 cm), resultante do manejo do solo. Em estudo com Organossolos de várzea no Nordeste do Brasil, Cipriano-Silva *et al.* (2014) encontraram valores mínimos de estoques de C de aproximadamente 200 Mg ha⁻¹, mesmo em áreas intensamente manejadas.

Figura 1 - Teores de carbono orgânico total (COT) e estoques de C (Est_C) nas diferentes profundidades de um Organossolo cultivado.



3.2 Elementos potencialmente tóxicos

A Tabela 2 apresenta os teores de EPTs para as diferentes profundidades. Ao comparar os resultados com os valores de referência para solos estabelecidos pelas diretrizes do CONAMA (2009) e da CETESB (2016), observa-se que o cádmio (Cd) representa o maior risco potencial de contaminação (Tabela 3). Esse elemento apresenta concentrações superiores ao valor de prevenção (VP), especialmente na camada de 20–40 cm, com teor

de 1,4 mg kg⁻¹. O Cd possui alta toxicidade, com efeitos cumulativos no organismo, semelhantes ao chumbo (Pb). Ainda assim, existe uma preferência seletiva pelo Pb, que é explicado em parte, pelo menor raio iônico do Cd e pelas diferenças nas configurações eletrônicas dos metais (Soares *et al.*, 2015b; Pelinsom *et al.*, 2020).

Tabela 2 - Teores de elementos potencialmente tóxicos em Organossolo, em diferentes profundidades.

Profundidade	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Fe
cm	mg kg ⁻¹						g kg ⁻¹	
0-10	1,2	24,1	100,8	57,6	25,9	49,9	52,6	19,10
10-20	1,4	24,6	103,3	59,3	25,9	49,0	60,4	29,23
20-30	1,4	24,6	103,9	59,6	26,4	50,3	61,5	24,35
30-40	1,4	24,9	104,9	62,1	27,7	50,8	60,3	22,99

Tabela 3 - Valores orientadores^{1,2} para os diferentes níveis de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) no solo.

Elemento	Valor de referência de qualidade (VQR) ¹	Valor de prevenção (VP) ²	Valor de intervenção (VI) agrícola ²
	mg kg ⁻¹		
Cd	< 0,5	1,3	3
Cr	40	75	150
Cu	35	60	200
Ni	13	30	70
Pb	17	72	180
Zn	60	300	450

¹Valores retirados do Manual da Cetesb (2014). ²VP e VI agrícola retirados da Resolução CONAMA (2009)

As condições de alternância da profundidade do lençol freático, mesmo em Organossolos com drenagem, favorecem ciclos redox intensos, os quais afetam diretamente a especiação química, solubilidade e mobilidade de EPTs como o Cd e Pb. Em condições redutivas, esses elementos tendem a formar compostos insolúveis com sulfetos, reduzindo sua disponibilidade. No entanto, o rebaixamento do lençol freático, com subsequente aumento da oxidação do solo, promove a liberação de EPTs na solução do solo, o que aumenta seu potencial tóxico. Nesse contexto, o Cd se destaca como elemento de maior risco ambiental, devido à sua alta mobilidade em solução com pH mais ácido e à baixa capacidade de retenção pelos colóides orgânicos (Colzato, Alleoni & Kamogawa, 2018; Sypalov *et al.*, 2022). Comportamento semelhante é observado por Gandois *et al.* (2020), com aumento dos teores de Cd em áreas de turfeiras drenadas submetidas ao manejo intensivo na Indonésia.

O cromo (Cr) apresenta teores variando entre 24,1 e 24,9 mg kg⁻¹, com pequeno incremento em profundidade. Ainda assim, esses valores permanecem abaixo do Valor de Qualidade de Referência (VQR), estabelecido em 40 mg kg⁻¹. No solo, a solubilidade do Cr depende fortemente da sua forma química. O Cr³⁺, forma predominante em ambientes redutores, caracteriza-se por baixa mobilidade, sendo frequentemente

precipitado na forma de hidróxidos em meios alcalinos ou levemente ácidos, ou ainda complexado por compostos orgânicos como ácidos húmicos e fúlvicos presentes em abundância nos Organossolos (Sypalov *et al.*, 2022).

A atividade microbiana também pode influenciar significativamente o estado de oxidação do Cr, alterando sua solubilidade e, conseqüentemente, sua disponibilidade e mobilidade no solo (Liu *et al.*, 2021). Zoffoli *et al.* (2012), ao avaliarem os teores de EPTs em diferentes substratos, identificaram concentrações elevadas de Cr em substratos contendo turfa. Os autores associaram a presença desses elementos à fração orgânica do substrato, uma vez que turfeiras possuem alta capacidade de adsorção e atuam como ambientes propícios ao acúmulo de diversos metais pesados.

Os teores de cobre (Cu) no solo variam entre 100,8 e 104,9 mg kg⁻¹, ultrapassando o Valor de Prevenção (VP), estabelecido em 60 mg kg⁻¹. A concentração elevada desse elemento pode ser atribuída, principalmente, ao uso intensivo de insumos agrícolas contendo Cu em sua formulação, com destaque para fungicidas à base de cobre amplamente utilizados no manejo fitossanitário. No solo, o Cu tende a formar complexos organometálicos estáveis com a MO, além de acumular junto à fração mineral do solo (Sypalov *et al.*, 2022), o que pode limitar sua mobilidade e reduzir sua solubilidade. Esse comportamento contribui para a sua persistência no ambiente, ainda que a disponibilidade para as plantas e organismos do solo seja relativamente baixa.

Os teores de níquel (Ni) apresentaram tendência de aumento com a profundidade, variando de 25,9 mg kg⁻¹ na camada de 0–20 cm a 27,7 mg kg⁻¹ na camada de 30–40 cm. Esses valores estão próximos ao Valor de Prevenção (VP) para o elemento, que é de 30 mg kg⁻¹. Já os teores de chumbo (Pb) variaram entre 49,0 e 50,9 mg kg⁻¹, excedendo significativamente o Valor de Qualidade de Referência (VQR), fixado em 17 mg kg⁻¹. De acordo com Sypalov *et al.* (2022), o Pb pode ser usado como um marcador da atividade humana.

O Pb apresenta alta afinidade pela MO, com a qual forma complexos estáveis que limitam sua mobilidade no solo (Lima *et al.*, 2018; Pelinsom *et al.*, 2020). Somado a isso, a presença de Pb, assim como de outros metais como As, Cu, Cd, Co e Ni, está fortemente associada ao uso de fertilizantes, herbicidas e inseticidas (Zoffoli *et al.*, 2012). Dessa forma, o aumento das concentrações de Pb no solo pode ser interpretado como um indicativo da influência antrópica sobre o sistema, na qual o Pb presente no solo permanece retido junto à MO.

Os teores de zinco (Zn) variam entre 52,6 e 61,5 mg kg⁻¹, com teor menor na superfície (0–10 cm) e maior na camada de 20–30 cm, ultrapassando o Valor de Qualidade de Referência (VQR), que é de 60 mg kg⁻¹. Esses teores podem estar associados ao uso de corretivos, fertilizantes ou inseticidas que contêm metais como Zn, Cu e Mn em sua composição (Zoffoli *et al.*, 2012; Soares *et al.*, 2015b). Embora esses elementos estejam presentes em concentrações relativamente baixas nos insumos agrícolas (Soares *et al.*, 2015b), o uso contínuo pode levar ao acúmulo no solo e potencialmente gerar efeitos negativos a longo prazo.

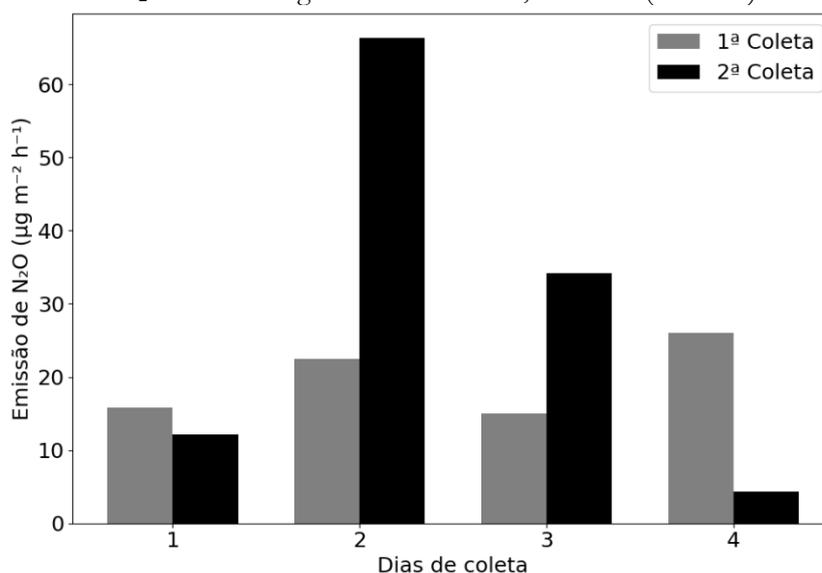
Para os elementos ferro (Fe) e manganês (Mn), não existem valores de referência estabelecidos, devido à sua abundância natural nos solos e à alta variabilidade em função dos estados de oxidação. A especiação de ambos os elementos é fortemente influenciada pelo pH e pelo potencial de oxirredução (Soares *et al.*, 2015b; Lima *et al.*, 2018). O Mn, por exemplo, apresenta elevado potencial redox e maior mobilidade em condições redutoras, sendo diretamente afetado pela profundidade do lençol freático.

Dentre os elementos analisados, o Fe apresenta as maiores concentrações, o que não implica, contudo, em risco de contaminação, uma vez que os níveis observados estão abaixo do limiar de toxicidade. O Fe e o Mn são normalmente encontrados em maiores quantidades nos solos, sendo o Fe frequentemente o elemento de maior concentração entre os metais analisados (Lima *et al.*, 2018). Em condições de pH ácido e ambiente anaeróbico, ocorre a redução de ambos os elementos, tornando-os mais solúveis e facilitando seu deslocamento no perfil do solo, especialmente sob influência do lençol freático.

3.3 Emissão de gases de efeito estufa

Há diferenças entre os dois períodos de coleta, com valores maiores e mais discrepantes na segunda coleta, variando de 4,3 a 66,4 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$, enquanto na primeira coleta os valores variam de 15,0 a 26,0 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{h}^{-1}$ (Figura 2).

Figura 2 - Emissão de N_2O em um Organossolo cultivado, no verão (1ª coleta) e inverno (2ª coleta).



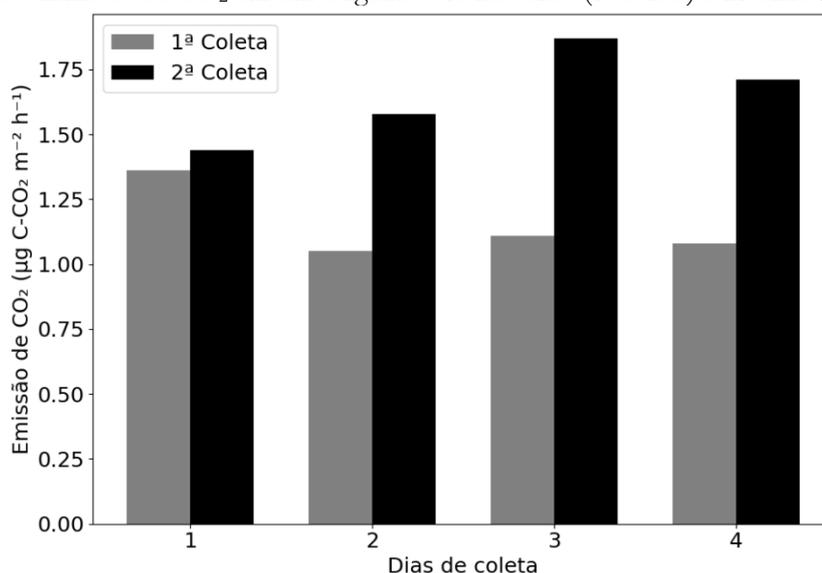
Os dados da primeira coleta, realizada no verão, indicam menores taxas de emissão de N_2O em comparação aos valores máximos registrados na segunda coleta. Essa diferença pode ser atribuída à uma condição de estabilidade do meio, uma vez que o aumento do fluxo de gases está diretamente relacionado à aceleração das reações microbiológicas e físico-químicas no solo.

O aumento na emissão de N_2O observado no segundo dia da segunda coleta, realizada no inverno, pode estar associado a perturbações no solo, bem como a variações nos teores de água e, principalmente, na temperatura. A produção de N_2O também pode ser estimulada pela adição de carbono lábil, por meio de resíduos vegetais de culturas, intensificando a atividade metabólica de microrganismos que favorece processos de desnitrificação (Alves *et al.*, 2017; Kluber *et al.*, 2020). Além disso, o manejo agrícola da área pode ter exercido influência significativa nesse pico de emissão, por meio da aplicação recente de fertilizantes nitrogenados. O fornecimento de nitrogênio mineral (particularmente na forma de amônio ou nitrato) aumenta a disponibilidade de substrato para os processos microbiológicos de nitrificação e desnitrificação, que são as principais vias de

produção de N₂O no solo.

Quanto à emissão de CO₂ (Figura 3), observa-se um comportamento distinto em relação ao N₂O. Durante a primeira coleta, o primeiro dia apresentou a maior emissão de CO₂, com valor de 1,4 kg C-CO₂ m⁻² h⁻¹, seguido de uma redução nos fluxos nos dias subsequentes, estabilizando-se em torno de 1,1 kg C-CO₂ m⁻² h⁻¹. Durante a segunda coleta (inverno), as taxas de emissão de CO₂ foram superiores às observadas na primeira coleta (verão), o que contradiz a tendência geralmente observada na literatura, onde as maiores emissões ocorrem em períodos mais quentes (Kluber *et al.*, 2020).

Figura 3 - Emissão de CO₂ em um Organossolo no verão (1^a coleta) e inverno (2^a coleta).



Essa aparente contradição pode estar relacionada a fatores ligados ao manejo agrícola e corrobora com os resultados obtidos das taxas de emissão de N₂O, para o mesmo período. Neste caso, a mineralização da matéria orgânica pode ter sido favorecida pela fertilização nitrogenada. A aplicação de nitrogênio, ou sua liberação via mineralização, não apenas estimula a produção de biomassa microbiana, como também pode acelerar o ciclo do carbono, intensificando a liberação de CO₂. Essa interação entre N e C pode também ajudar a explicar o aumento concomitante de N₂O e CO₂ registrado nesse período (Kluber *et al.*, 2020). Portanto, o aumento das emissões de CO₂ durante a segunda coleta é compatível com um cenário de manejo agrícola recente.

Em estudos conduzidos por Dorrepaal *et al.* (2009) observou-se que, em solos orgânicos, aproximadamente 69% do aumento nas taxas de respiração teve origem nas camadas mais profundas (25–50 cm), indicando uma contribuição significativa dessas camadas para a emissão de CO₂. Esse comportamento é fortemente influenciado pela profundidade do lençol freático. Os autores destacam ainda que a sensibilidade das taxas de emissão de CO₂ do solo depende, sobretudo, da disponibilidade relativa e absoluta de compostos recalcitrantes presentes no substrato, bem como das restrições ambientais que limitam os processos de decomposição.

4 Conclusão

Os resultados obtidos evidenciam que o manejo agrícola intensivo aplicado ao Organossolo tem provocado alterações em suas propriedades. Os teores elevados de Ca, K e P, com acúmulo na camada superficial, indicam a aplicação frequente de fertilizantes, enquanto a redução dos teores e estoques superficiais de C sugere degradação da matéria orgânica, possivelmente acelerada por práticas de preparo do solo e drenagem.

A presença de elementos potencialmente tóxicos, como Pb, Zn e Cu, em concentrações elevadas, reforça a influência do uso recorrente de insumos agrícolas, especialmente fertilizantes fosfatados e corretivos. O aumento desses elementos pode ser favorecido pelo elevado conteúdo de matéria orgânica neste solo, mas também levanta preocupações sobre sua mobilidade e risco ambiental.

As taxas de emissão de N₂O e CO₂ variaram entre os períodos de avaliação, refletindo a influência de fatores sazonais, mas também a interferência do manejo. Esses achados reforçam a necessidade de estratégias de manejo mais sustentáveis, com foco na preservação da matéria orgânica, monitoramento de contaminantes e controle das emissões de GEE, especialmente em Organossolos, localizados em áreas periurbanas sob crescente pressão antrópica.

Conflitos de interesses

Todos os autores declaram que não há conflitos de interesse e estão cientes da submissão do artigo.

Contribuições dos autores

Silva, R.C.: Conceituação, metodologia, análise formal, investigação, redação, visualização. Pereira, M.G.: Conceituação, metodologia, validação, investigação, recursos, supervisão, apoio financeiro.

Referências

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/05>
- Alves, B. J. R., Scivittaro, W. B., Jantalia, C. P., Sousa, R. O., Bayer, C., Rodrigues, R. A. R., Boddey, R. M., Urquiaga, S., & Madari, B. E. (2017). *Protocolo para medições de fluxos de gases de efeito estufa em sistemas aeróbicos e alagados de produção de grãos-Rede Fluxus*. Documentos 306. Seropédica: Embrapa Agrobiologia.
- Bispo, D. F. A., Silva, A. C., Matosinhos, C. C., Silva, M. L. N., Barbosa, M. S., Silva, B. P. C., & Barral, U. M. (2015). Characterization of headwaters peats of the Rio Araçuaí, Minas Gerais State, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 39, 475-489. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140337>
- Campos, J. R. R., Silva, A. C., Silva, E. B., & Vidal-Torrado, P. (2014). Extração e quantificação de alumínio trocável em Organossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 49, 207-214. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000300007>

Canto, A. C. B., Fontana, A., Cesário, F., Figueiredo, L. G. E., & Cheauzu H. (2020). Organossolos e outros solos com horizontes orgânicos no Brasil: abrangência e área manejada entre os anos de 1994 a 2020. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/213582/1/CNPS-BPD-267-2020.epub>

Cipriano-Silva, R., Valladares, G. S., Pereira, M. G., & Anjos, L. H. C. (2014). Caracterização de Organossolos em ambientes de várzea do Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 26-38. <https://doi.org/0.1590/S0100-06832014000100003>

Colzato, M., Alleoni, L.R.F. & Kamogawa, M.Y. (2018). Cadmium sorption and extractability in tropical soils with variable charge. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190, 345. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6666-7>

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). (2016). *Decisão de Diretoria nº 256/2016/E: Dispõe sobre a aprovação dos “Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2016” e dá outras providências.* Diário Oficial, p. 55–56. Publicado em 2018.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). (2009). *Resolução nº 420, de 28 de dezembro de 2009: Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.* Diário Oficial da União, nº 249, p. 81–84. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-420-de-28-de-dezembro-de-2009-5585136> (Acessado em 23 de fevereiro de 2010).

Dorrepaal, E., Toet, S., Van Logtestijn, R. S., Swart, E., Van De Weg, M. J., Callaghan, T. V., & Aerts, R. (2009). Carbon respiration from subsurface peat accelerated by climate warming in the subarctic. *Nature*, 460(7255), 616-619. <https://doi.org/10.1038/nature08216>

Ebeling, A. G., Anjos, L. H. C., Perez, D. V., Pereira, M. G., & Novotny, E. H. (2013). Atributos físicos e matéria orgânica de Organossolos Háplicos em distintos ambientes no Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 763-774. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300023>

Gandois, L., Hoyt, A. M., Mounier, S., Le Roux, G., Harvey, C. F., Claustres, A., ... & Anshari, G. (2020). From canals to the coast: dissolved organic matter and trace metal composition in rivers draining degraded tropical peatlands in Indonesia. *Biogeosciences*, 17(7), 1897-1909. <https://doi.org/10.5194/bg-17-1897-2020>

International Organization for Standardization-ISO. (1995). ISO 11466:1995 – *Soil quality – Extraction of trace elements soluble in aqua regia*. Geneva, Switzerland: ISO.

Kluber, L. A., Johnston, E. R., Allen, S. A., Hendershot, J. N., Hanson, P. J., & Schadt, C. W. (2020). Constraints on microbial communities, decomposition and methane production in deep peat deposits. *PLoS One*, 15(2), e0223744. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223744>

Lima, E. S. A., Santana Matos, T., Pinheiro, H. S. K., Guimarães, L. D. D., Pérez, D. V., & Amaral Sobrinho, N. M. B. (2018). Soil heavy metal content on the hillslope region of Rio de Janeiro, Brazil: reference values. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6736-x>

Liu, X., Chen, X., Zhang, X., Guo, H., Zhang, C., Zang, X., & Li, B. (2021). Quantifying the influence of soil factors on the migration of chromium (VI). *Process Safety and Environmental Protection*, 155, 32-40.

Pelinsom Marques, J., Silvestre Rodrigues, V. G., Monici Raimondi, I., & Zanin Lima, J. (2020). Increase in Pb and Cd adsorption by the application of peat in a tropical soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 231, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04507-z>

- Pereira, M. G., Araújo, A. L. S., Dortzbach, D., Tavares, O. C. H., & Neto, E. C. S. (2020a). Estimativa da acidez potencial através do método do pH SMP em solos de altitude de Santa Catarina. *Agropecuária Catarinense*, 33(1), 50-55. <https://doi.org/10.52945/rac.v33i1.531>
- Pereira, M. G., Loss, A., Schultz, N., Zonta, E., Guareschi, R. F., & Santos, O. A. Q. (2020b). Fertilidade de um organossolo e produtividade do feijoeiro influenciados pela calagem e inoculação. *Agrarian*, 13(48), 211-221. <https://doi.org/10.30612/agrarian.v13i48.10838>
- Raij, B. Van., Andrade, J.C., Cantarela, H., Quaggio, J.A. (2001). *Análise química para a avaliação da fertilidade de solos tropicais*. Campinas. Instituto Agronômico.
- Santos, H. G., Jacomine, P. K. T., Anjos, L. H. C., Oliveira, V. A., Lumbreras, J. F., Coelho, M. R., Almeida, J. A., Araujo Filho, J. C., Oliveira, J. B., & Cunha, T. J. F. (2018). *Sistema Brasileiro De Classificação de Solos*. Brasília: Embrapa.
- Santos, O. A. Q. D., Silva, E. C. D., García, A. C., Fagundes, H. D. S., Diniz, Y. V. D. F. G., Ferreira, R., & Pereira, M. G. (2020). Impact of land use on Histosols properties in urban agriculture ecosystems of Rio de Janeiro, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 44, e0200041. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200041>
- Soares, P. F. C., Zuchello, F., Anjos, L. H. C., Pereira, M. G., & Oliveira, A. P. P. (2015a). Soil attributes and C and N variation in Histosols under different agricultural usages in the state of Rio de Janeiro, Brazil. *Bioscience Journal*, 31(5), 1349-1362.
- Soares, A. P., Weber, O. L. S., & Santo, O. E. (2015b). Metais pesados em calcários do Estado de Mato Grosso. *Geociências*, 34(3), 465-474.
- Sypalov, S. A., Kozhevnikov, A. Y., Ivanchenko, N. L., Danilova, E. V., Shestakov, S. L., & Belesov, A. V. (2022). Characterization of the organic components of peat and implications for the binding of toxic trace elements. *Mires and Peat*, 28, 36-21. <https://doi.org/10.19189/MaP.2022.OMB.562>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro, Embrapa.
- Zoffoli, H. J. O., Amaral-Sobrinho, N. M. B., Zonta, E., Luisi, M. V., Marcon, G., & Tolón-becerra, A. (2013). Inputs of heavy metals due to agrochemical use in tobacco fields in Brazil's Southern Region. *Environmental monitoring and assessment*, 185(3), 2423-2437.