



Atividade microbiana como indicador de resposta ambiental em área de deposição de resíduo siderúrgico

Tamyres Pereira de Sousa¹, Andressa Ribeiro dos Anjos¹, Mateus do Carmo Rocha¹, Hanna Emily Lima de Moraes¹,
Álison Rangel Albuquerque¹, Milena Pupo Raimam^{1*}

¹Universidade do Estado do Pará, Laboratório de Bioprodutos e Energia da Biomassa, Avenida Hiléia s/n, Agrópolis do INCRA, Bairro Amapá, CEP 68502-100, Marabá, PA, Brasil

*Autor correspondente:
milenaaraimam@gmail.com

Termos para indexação:

Carbono
Biomassa
Quociente microbiano

Index terms:

Carbon
Biomass
Microbial quotient

Histórico do artigo:

Recebido em 30/01/2020
Aprovado em 15/03/2022
Publicado em 03/10/2022

Resumo - O solo é um meio de propriedades complexas e dinâmicas e é resultante do efeito integrado do clima e dos organismos vivos, os quais agem sobre o material de origem, condicionado pelo relevo durante um certo período de tempo. Alterações naturais ou provocadas são percebidas rapidamente pelos microrganismos do solo, os quais são altamente sensíveis à presença de contaminantes, podendo ser utilizados como bioindicadores de estresse ambiental. O objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos do resíduo siderúrgico (RS), poeira de exaustão, sobre a atividade microbiana do solo. As coletas de amostras de solo foram realizadas em duas áreas de mata (área A isenta de RS e área B com RS), localizadas no município de Marabá, PA, considerando as estações chuvosa (2018) e seca (2019). A atividade microbiana foi determinada pela respiração basal do solo, do carbono de biomassa microbiana (CBM) e dos quocientes metabólico (qCO_2) e microbiano ($qMic$). Não houve diferença no teor de carbono orgânico total do solo entre as áreas, porém o CBM e o $qMic$ foram inferiores na área B nas duas estações investigadas, demonstrando a contribuição do pó de exaustão na redução da atividade microbiana e diminuição das reservas de carbono do solo.

Microbial activity as an indicator of environmental response in a steelmaking waste disposal area



Abstract - The soil is a medium with complex and dynamic properties. It is the result of the integrated effect of climate and living organisms, which act on the source material, conditioned by the relief during a certain period of time. Natural or induced changes are quickly perceived by soil microorganisms, which are highly sensitive to the presence of contaminants, and can be used as bio-indicators of environmental stress. The objective of this study was to evaluate the effects of steel residue (SR) exhaust dust on soil microbial activity. Soil sample collections were carried out in two forest areas located in the municipality of Marabá, Para State (area A free of SR and area B with SR), considering the rainy (2018) and dry (2019) seasons. Microbial activity was determined through basal soil respiration and microbial biomass carbon (MBC), in addition to the metabolic (qCO_2) and microbial ($qMic$) quotients. There was no difference in soil total organic carbon content between areas, but MBC and $qMic$ were lower in area B in the two investigated seasons, demonstrating the contribution of exhaust dust in reducing microbial activity and decreasing soil carbon reserves.

Introdução

O solo é um organismo vivo complexo, constituindo o principal reservatório de diversidade dos microrganismos, os quais respondem rapidamente a qualquer alteração que ocorra neste ambiente, pois participam ativamente em vários processos vitais como a decomposição da matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a purificação de compostos xenobióticos, entre outros (Fraga et al., 2012).

A comunidade microbiana do solo (fungos, bactérias, actinomicetos e protozoários) desempenha diversas atividades biológicas, que colaboram para a saúde e fertilidade do solo. As relações ecológicas entre estes também são essenciais para a manutenção do equilíbrio neste ambiente, refletindo diretamente sobre as demais comunidades presentes (Cardoso & Andreote, 2016).

A microbiota do solo, através da sua composição e dinâmica, pode ser indicadora da qualidade ambiental, podendo ser correlacionada com degradação ou contaminação de ambientes (Araújo & Monteiro, 2007). Isto se deve à alta sensibilidade e rápida resposta que estes microrganismos apresentam frente às situações de estresse. Para observação da qualidade do solo, pode-se utilizar como parâmetro as características de ecossistemas naturais sustentáveis, como as florestas (Moreira & Siqueira, 2006).

Os principais indicadores microbiológicos que compõem ferramentas úteis para avaliação da qualidade do solo em curto e longo períodos são a respiração basal do solo (RBS), o quociente metabólico (qCO_2), o quociente microbiano ($qMic$) e a biomassa microbiana (BMS), visto que os processos metabólicos dependem do estado fisiológico microbiano bem como dos fatores abióticos do meio como umidade, temperatura, estrutura e aeração do solo, disponibilidade de nutrientes, entre outros.

A RBS pode ser definida como a soma total das atividades microbiológicas, sendo representada pela liberação de CO_2 , através dos processos metabólicos realizados pelos microrganismos vivos no solo, e pela oxidação da matéria orgânica por organismos aeróbios, como as bactérias e os fungos (Siqueira et al., 2018). A liberação de CO_2 em forma de RBS é um indicativo que há atividade microbiana no solo, sendo que altas taxas de respiração podem demonstrar aumento de carbono para a atmosfera e redução de carbono orgânico do solo.

O qCO_2 indica a eficiência com que os microrganismos usam os recursos de carbono presentes no solo, sendo que solos estressados fornecem valores mais elevados

comparados a ambientes mais equilibrados (menor qCO_2), reduzindo as perdas na forma de CO_2 (Santos et al., 2018).

O $qMic$ quantifica o percentual de reserva de carbono orgânico total no solo, fixado nas células microbianas. Quanto menores os valores de $qMic$, menores são as reservas de compostos orgânicos nessa área que, geralmente, apresentam baixa atividade microbiana (Carneiro et al., 2009). Logo, valores elevados de $qMic$ demonstram melhores condições ao desenvolvimento microbiano, indicando que a matéria orgânica do solo está ativa e que há redução de fatores limitantes da microbiota, facilitando o processo de decomposição (Chaer & Tótola, 2007).

De acordo com Hoffmann et al. (2018), a biomassa microbiana apresenta alta sensibilidade e variação diante das mudanças que ocorrem no solo, podendo ser uma excelente indicadora de qualidade, já que é responsável pela regulação, transformação e acúmulo de nutrientes. A mensuração da quantidade de carbono que a comunidade microbiana imobiliza em suas células define o carbono da biomassa microbiana (CBM) e sua avaliação permite realizar comparações entre solos e reflete as mudanças no manejo ou o impacto da poluição sobre estes (Insam, 2001). Em geral, áreas com vegetação nativa apresentam maiores teores de CBM do que em solos cultivados ou que recebam algum tipo de fertilizante mineral (Kaschuk et al., 2010; Dornelles et al., 2017).

Os resíduos industriais estão entre os maiores responsáveis pelas agressões ao meio ambiente. Especificamente a indústria siderúrgica, importante setor da economia brasileira, gera cerca de 600 kg de resíduos como escórias, lamas e pós para cada tonelada de aço produzido (IAB, 2018), os quais apresentam em sua composição substâncias orgânicas e inorgânicas, como metais pesados, fenóis e surfactantes (Souza et al., 2016).

O pó de exaustão ou pó de despoejamento, gerado em aciarias elétricas, é composto por um material bem fino, com partículas bastante reduzidas, cuja composição majoritária envolve os elementos Fe, Zn, Ca, Si, Mn, Cr, K e S, podendo apresentar ainda Pb, Al, Cu, entre outros, em virtude da composição da matéria prima utilizada (Silva et al., 2008; Grilo et al., 2013).

A influência de elementos potencialmente tóxicos no solo sobre a atividade microbiana é investigada massivamente e os estudos demonstram diversas correlações entre tipos de metais, seu comportamento no solo e efeitos sobre a comunidade microbiana, quase

sempre ocasionando a redução da diversidade, densidade e atividade dos microrganismos no solo (Barros et al., 2010; Marcin et al., 2013; Xu et al., 2019).

Avaliar o grau de estresse ambiental causado pela presença do pó de exaustão depositado diretamente sobre o solo permite inferir sobre a capacidade metabólica dos microrganismos frente a estes compostos e o perfil de resposta à perturbação ambiental, gerando assim mais informações sobre a gestão dessas substâncias no ambiente.

Assim, este trabalho objetivou utilizar a atividade microbiana como parâmetro comparativo para avaliar os efeitos do resíduo pó de exaustão em solos tropicais.

Material e métodos

Localização e caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado no município de Marabá, PA, entre maio de 2018 e novembro de 2019. A vegetação de ocorrência natural tem predomínio de Floresta Ombrófila Aberta, sendo encontradas florestas abertas mistas e, em menor escala, florestas abertas latifoliadas (Raiol, 2010). Foi comparada uma área de mata remanescente de vegetação natural pertencente à reserva biológica

Fundação Zoobotânica de Marabá, denominada neste estudo de área A, com uma de mata em regeneração localizada às margens do pátio de deposição de resíduos, pertencente a uma usina siderúrgica, compreendendo a área B (Figura 1). Esta área está abaixo do nível do pátio de deposição e parte do resíduo pó de exaustão vazou chegando à periferia da mata, formando uma camada com espessura variando de 2 a 5 cm, com histórico de 10 anos. Entre a primeira e a segunda coleta, foi necessária a intervenção de manutenção do talude, implicando em modificações na camada de solo superficial.

Coleta e preparo das amostras

Em cada área, foi realizada uma coleta em novembro/dezembro de 2018 (estação chuvosa) e outra em agosto de 2019 (estação seca), sendo definidas cinco parcelas de 10 m². Em cada parcela, foi coletada uma amostra composta, com sete subamostras da profundidade 0-10 cm, com o auxílio de um trado holandês. As amostras foram homogeneizadas e os resíduos de plantas removidos cuidadosamente, sendo em seguida peneiradas em peneira de malha 4 mm e armazenadas a uma temperatura de 7 ± 3 °C até o momento do processamento.

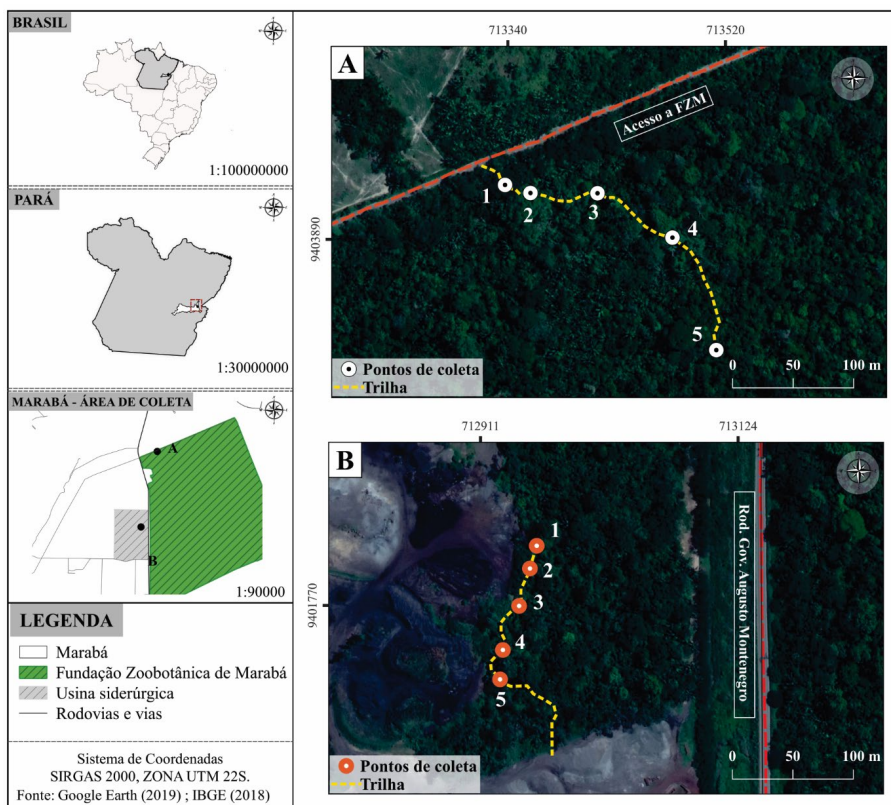


Figura 1. Localização geográfica da área de estudo e pontos de coleta de amostras.

Figure 1. Geographic location of the study area and sample collection points.

Análises físico-químicas

A umidade das amostras foi determinada segundo o Manual de Análise de Solo (Teixeira et al., 2017) e a capacidade de campo foi obtida segundo Bernardo et al. (2009). Amostras de solo foram enviadas ao Laboratório de Análise de Solos da Embrapa Amazônia Oriental para análise de granulometria, fertilidade e teor de nitrogênio total.

O teor de carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método de Walkley - Black (Jackson, 1982). A classificação física dos solos foi determinada com o uso do aplicativo Triângulo textural, disponível em várias plataformas (Quoos et al., 2011).

Atividade microbiana

Para avaliação do carbono da biomassa microbiana (CBM) foi utilizado o método da fumigação-incubação das amostras, seguindo a metodologia descrita por Jenkinson & Powlson (1976), com algumas modificações. A quantidade CBM do solo foi determinada pela diferença entre o CO₂ liberado das amostras fumigadas (F) e não fumigadas (NF), durante cinco dias de incubação, utilizando um fator de correção (K_c) de 0,41 (Anderson & Domsch, 1978). O quociente metabólico (qCO₂) foi obtido pela razão entre a taxa de respiração microbiana e o CBM e o quociente microbiano (qMic) foi determinado pela relação entre o CBM e o COT (Anderson & Domsch, 1993).

Análise estatística

As análises foram realizadas considerando o delineamento: duas áreas de estudo x duas épocas de coleta/estações (2018 e 2019) x cinco amostras x uma profundidade de solo. Os dados obtidos foram transformados em log, quando necessário, e submetidos à análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey (p < 0,05). Foram utilizados os softwares Past 3.26 e Action Stat.

Resultados

Os parâmetros físico-químicos do solo em cada uma das áreas estudadas estão apresentados na Tabela 1. A análise granulométrica demonstrou que as áreas apresentam solo de textura média, característica que influencia consideravelmente o comportamento físico-hídrico e químico do solo.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos do solo na camada de 0-10 cm nas duas áreas avaliadas, nos períodos chuvoso (2018) e seco (2019).

Table 1. Physical-chemical parameters of the soil in the 0-10 cm layer in the two evaluated areas, in the rainy (2018) and dry (2019) seasons.

	Área A	Área B	Área A	Área B
	2018		2019	
pH (H ₂ O)	4,6	4,5	5,5	8,1
Umidade (%)	30,14 a	29,93 a	30,55 a	15,30 b
C. O. T. (g. Kg ⁻¹)	2,47 a	2,23 a	2,18 a	2,17 a
M. O. (g. Kg ⁻¹)	4,27 a	3,85 a	3,76 a	3,73 a
Nitrogênio total (%)	0,17	0,09	0,15	0,14
P (mg dm ⁻³)	5,4	8,4	1,7	3,1
K (mg dm ⁻³)	96,2	122,8	55,6	201,1
Na (mg dm ⁻³)	61,1	31,8	34,6	174,9
Al (cmol _c dm ⁻³)	1,2	1,7	0,1	0,0
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,2	2,7	5,5	11,0
Ca+Mg (cmol _c dm ⁻³)	5,6	3,9	8,4	13,4
Areia Total (g kg ⁻¹)	245	248	299	184
Silte (g kg ⁻¹)	515	452	481	636
Argila total (g kg ⁻¹)	240	300	220	180

COT = carbono orgânico total; MO = matéria orgânica. *As letras iguais, na mesma linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5%.

No período chuvoso, não foi observada variação dos valores de pH entre as áreas, apresentando comportamento moderadamente ácido. Ao avaliar a estação seca, a área B apresentou um valor ligeiramente alcalino (8,1) enquanto a área A moderadamente ácido (5,5). No período chuvoso (2018) não houve diferença entre o teor de umidade das áreas, porém na estação seca (2019) esta diferença foi significativa, sendo 30,6% para a área A e 15,3% para a área B. Os teores de carbono orgânico total e matéria orgânica não apresentaram diferenças significativas entre as áreas avaliadas nem entre os períodos amostrados.

As análises sobre a presença de macronutrientes demonstrou baixos teores de nitrogênio total em todas as coletas. No entanto, o P apresentou níveis considerados baixos a médios, com exceção da área A no período seco, que apresentou nível muito baixo (1,7 mg dm⁻³), havendo uma redução das concentrações do período chuvoso para o seco, nas duas áreas de estudo. Os elementos K e Na apresentaram valores médios a altos (> 30 mg dm⁻³ equivalente a > 0.76 mmol dm⁻³). Na

área A observou-se um decréscimo dos elementos K e Na da estação chuvosa para a estação seca, havendo uma redução de 96,2 para 55,6 mg dm⁻³ nos níveis de K e de 61,1 para 34,6 mg dm⁻³ de Na. Comportamento inverso foi observado na área B, havendo um aumento significativo da concentração destes na estação seca. O K apresentou incremento de 122,8 para 201,1 mg dm⁻³ e o Na, de 31,8 para 174,9 mg dm⁻³.

A análise referente aos teores de Al demonstrou redução deste elemento do período chuvoso para o seco. Na área A, foi observada redução de 1,2 para 0,1 cmol_c dm⁻³ e na área B os níveis reduziram de 1,7 para 0,0 cmol_c dm⁻³. As concentrações de Ca e Mg apresentaram comportamento semelhante nas duas áreas, com níveis menores na estação chuvosa e maiores na estação seca, sem anomalias para o tipo de solo.

Quanto a textura do solo no período chuvoso (2018), a área A foi classificada como franco siltosa e no período seco de textura franca. A área B variou de franco argilosa no período chuvoso e franco siltosa no período seco. Embora a textura do solo seja uma característica imutável, é provável que ocorra a adição de argilominerais ao perfil do solo (deposição) e sua consequente translocação às camadas subsuperficiais. No caso da área A a adição é facilitada devido ao relevo íngreme característico da topografia local. Na área B, é possível que algum material advindo da obra de manutenção do talude tenha se depositado na região de

estudo, visto que há certa declividade em direção a esta.

Os resultados das análises de respiração basal do solo (RBS), carbono da biomassa microbiana (CBM), e os quocientes metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic) nas duas estações estudadas estão apresentados na Tabela 2. Comparando a média da RBS entre as estações, observa-se diferença significativa apenas para a área B, sendo a emissão de CO₂ maior na estação chuvosa (1,712 μg C-CO₂ g⁻¹ solo h⁻¹) comparada à estação seca (0,360 μg C-CO₂ g⁻¹ solo h⁻¹). Os analisar a RBS entre as áreas de estudo, não foram observadas diferenças entre as áreas A e B no período chuvoso (C1), porém na estação seca (C2), a área A apresentou valores maiores de RBS (1,560 μg C-CO₂ g⁻¹ solo h⁻¹) comparada a área B (0,360 μg C-CO₂ g⁻¹ solo h⁻¹).

O CBM representa o quantitativo de carbono no solo imobilizado na comunidade microbiana. Sua determinação permite inferir sobre o acúmulo ou a perda de carbono, em detrimento da forma como o solo está sendo utilizado. Os resultados demonstram, inicialmente, que o CBM é estatisticamente superior na área A comparado à área B, independente da estação considerada (Tabela 2). Não houve influência da estação do ano sobre o CBM na área A, entretanto na área B foi observada uma diferença expressiva entre os valores de CBM, sendo 29,385 mg C-CBM kg⁻¹ solo na estação chuvosa e 2,365 mg C-CBM kg⁻¹ solo na estação seca.

Tabela 2. Respiração basal do solo (RBS), carbono de biomassa microbiana (CBM), quociente metabólico (qCO₂) e quociente microbiano (qMic) nas diferentes áreas de estudo, considerando as duas estações (2018-chuvosa e 2019-seca).

Table 2. Basal soil respiration (RBS), microbial biomass carbon (CBM), metabolic quotient (qCO₂) and microbial quotient (qMic) in the different study areas considering the two seasons (2018-rainy and 2019-dry).

	RBS (μg C-CO ₂ g ⁻¹ solo h ⁻¹)	CBM (mg C-CBM kg ⁻¹ solo)	qCO ₂ (μg C-CO ₂ g ⁻¹ C-CBM h ⁻¹)	qMic (%)
Área A – 2018	2,159 a	47,570 a	0,347ab	19,26 a
Área A - 2019	1,560 a	62,714 a	0,447ab	28,77 a
Área B – 2018	1,712 a	29,385 b	0,642 a	13,17 b
Área B – 2019	0,360 b	2,365 c	0,298 b	1,09 c

*As letras iguais, na mesma coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O qCO_2 apresentou valores significativos apenas na área B, onde pode ser observada uma expressiva redução, de $0,642 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C-CBM h}^{-1}$ na estação chuvosa para $0,298 \mu\text{g C-CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ C-CBM h}^{-1}$ na estação seca. Apesar disto, não houve diferença entre as áreas A e B, independente da estação do ano (Tabela 2).

O $qMic$ apresentou diferenças estatísticas entre as áreas, onde a área A apresentou valores superiores (Tabela 2). Analisando as diferenças entre as estações amostradas, apenas na área B observou-se diferenças significativas, sendo maior na estação chuvosa (13,2%) comparado à seca (1,1%).

Discussão

Os bioindicadores respondem rapidamente às mudanças relacionadas ao uso e cobertura do solo (Medeiros et al., 2015; Villani et al., 2017; Sá et al., 2018) e são ferramentas importantes no monitoramento do impacto de tais mudanças (Dilly et al., 2018).

O carbono orgânico do solo é oriundo da matéria orgânica do solo, a qual é compartimentalizada em fração não viva, representada pela liteira, frações leve e pesada; e pela fração viva, representada pela biomassa microbiana. É de se esperar que o maior aporte de matéria orgânica no solo eleve a atividade microbiana, conseqüentemente a mineralização e o aumento do teor de carbono orgânico total no solo. Os maiores teores de carbono de biomassa microbiana (CBM) observados na área A demonstram este comportamento (Tabela 2). O conteúdo de carbono orgânico do solo relacionado à matéria orgânica é frequentemente usado como um índice de atividade biológica do solo (Kizilkaya et al., 2004). Por outro lado, a presença de elementos potencialmente tóxicos (EPTs) contaminando o solo afeta negativamente as propriedades microbianas, como a respiração basal e a atividade enzimática, resultando em perda de eficiência na mineralização e menor estoque de C nos compartimentos do solo (Brohon, 2001; Lambais et al., 2005; Machado et al., 2014). O pó de exaustão apresenta em sua composição elementos como Fe, Zn, Pb, Cd, Cr e Cu, oriundos da matéria prima e das etapas do processo de produção do aço. Gulser & Erdogan (2008) demonstraram correlação negativa entre os teores de Pb, Cr, Cd, Cu, Ni, Fe e respiração basal do solo (RBS) e as atividades enzimáticas (urease, fosfatase alcalina, arilsulfatase) e correlação positiva destes indicadores com os teores de matéria orgânica do solo.

Embora os testes estatísticos utilizados não tenham demonstrado diferenças na matéria orgânica e no carbono orgânico total entre as estações do ano amostradas, o que pode indicar número amostral insuficiente, os menores valores observados na área B associados à redução da RBS e dos valores do quociente metabólico (qCO_2), apontam a tendência de inibição da atividade microbiana no ambiente contaminado, cujo impacto apareceria no período de seca. Estes resultados podem ser embasados por estudos como de Lad & Samant (2015) que, ao compararem área de floresta, área agrícola e duas áreas de minas de bauxita, perceberam que as áreas de minas possuíam uma menor taxa de carbono orgânico quando comparada às demais e concluíram que a bauxita afetou negativamente o estoque de carbono no solo. Reis et al. (2014) observaram resultado semelhante, ao compararem a qualidade do solo em área de mineração com área de vegetação nativa.

Não houve influência da sazonalidade nos teores de carbono orgânico total (COT) e matéria orgânica (MO), resultados que diferem dos observados por Rocha (2018), onde os menores teores de COT foram encontrados no período seco, em decorrência no menor aporte de MO no solo e subsequente mineralização.

Embora baixos, houve variação importante nos teores de P entre as coletas para uma mesma área, as quais podem estar relacionadas à sazonalidade, com alterações na taxa de mineralização, alterações de pH, podendo haver perdas por lixiviação entre outros fatores (Elser, 2012; Fan et al., 2014; Zhu et al., 2021). Efeitos antropogênicos que resultam em variação de acidez do solo não são descartados nas duas áreas em questão, e estes influenciam na mobilidade do P, sua fração disponível e mais facilmente quantificável (Bol et al., 2016).

Os atributos físico-químicos do solo, como textura, estrutura, densidade, compactação, profundidade de enraizamento, capacidade de água disponível, percolação da água, entre outros presentes nos micro-habitats do solo, relacionam-se diretamente com a composição e atividade da comunidade microbiana (Gomes & Filizola, 2006) e, conseqüentemente, com a ciclagem e disponibilidade de nutrientes (Azcón-Aguilar & Barea, 2015; Stacey et al., 2019; Jeyakumar et al., 2020). Logo o equilíbrio ecológico da comunidade microbiana do solo tem relação direta com o teor C, N, juntamente com o teor de P e pH (Bru et al., 2011; Carnicer et al., 2015).

O pH é afetado diretamente pela presença de pós de exaustão sobre o solo. Experimentos adicionais, realizados em nosso laboratório com o resíduo, demonstram valores de pH bastante alcalino, variando de 11,2 a 12,4. O valor de pH observado na área B no período seco (8,1) reflete a lixiviação do coproduto no solo e, conseqüentemente, a redução da atividade microbiana, como apontam os baixos valores de qCO_2 e do quociente microbiano ($qMic$).

O pó de exaustão também influenciou o teor de umidade. As características físicas deste resíduo e seu comportamento frente à lixiviação da água foram avaliados previamente em nosso laboratório, onde sua granulometria demonstrou-se compatível com textura siltosa e seu comportamento foi semelhante ao da argila no solo, quando tratamos apenas de força de adesão e coesão. As partículas de pó misturadas ao solo foram lixiviadas e, devido à sua aparente alta força de adesão e coesão, acumularam-se em subsuperfície (acúmulo entre os agregados) formando uma espécie de barreira, o que pode ter acarretado a diminuição da velocidade de percolação da água, favorecendo seu escoamento superficial e evaporação (Raimam & Albuquerque, 2019). Estas características sugerem que a alta concentração do resíduo observada na área B em 2019 justifica a baixa umidade do solo observada, pelo comportamento impermeabilizante na camada superficial do solo. A escassez de trabalhos na literatura científica avaliando o comportamento deste tipo de resíduo no perfil do solo, em específico, dificulta estabelecer correlações com maior exatidão.

A atividade microbiana aeróbica degradadora da MO é dependente do teor de umidade do solo, interferindo nas funções desempenhadas pela matéria orgânica no solo, como a melhoria da estrutura e aeração, retenção de umidade e incorporação de nutrientes (Barros, 2013). A baixa umidade do solo observada na área B pode explicar os baixos valores de RBS e CBM no período seco. Ainda, os fatores climáticos influenciam a microbiota do solo, visto que esta é altamente sensível aos efeitos diretos e indiretos das mudanças ao longo das estações e da variação da umidade do solo (Guimarães et al., 2017; Ren et al., 2017).

Lourente et al. (2011), analisando sistemas com mata nativa sob o efeito da sazonalidade, verificaram maior atividade microbiana (RBS) com o aumento da umidade do solo durante o verão, que no local de estudo, os maiores índices pluviométricos quando

comparado ao inverno. Segundo os autores, essa resposta ocorreu devido à inibição de grande parte da biomassa microbiana durante a estação seca, resultados semelhantes aos observados neste estudo, onde houve a redução da RBS e do teor de CBM com a redução de umidade do solo, no período de seca (Tabela 2). Com o aumento da umidade devido à retomada das chuvas, os microrganismos sobreviventes utilizam os compostos orgânicos acumulados, incluindo as células mortas, aumentando suas atividades. Resultados semelhantes também foram obtidos por Piao et al. (2000), Espíndola et al. (2001) e Diniz et al. (2014).

A redução da RBS observada na área B no período seco (Tabela 2) demonstra a interferência negativa do resíduo siderúrgico, que além de inibir a atividade microbiana pela elevação do pH, pode ter inibido a atividade enzimática microbiana. Xu et al. (2019) encontraram resultados semelhantes, onde a toxicidade do metal ocasionou influência negativa nos processos enzimáticos microbianos e nas funções celulares, tendo como resultado uma disfunção metabólica ou mesmo uma alteração nessa comunidade, observada pela menor respiração microbiana e pelo maior consumo de energia. Ainda, Silva et al. (2010) afirmam que ambientes com menor interferência antrópica apresentam maiores valores de emissão de C na forma de CO_2 , corroborando com os valores de RBS observados em nosso estudo.

Os valores de CBM obtidos neste estudo, principalmente na área B (Tabela 2), estão abaixo dos registros observados na literatura (Kaschuk et al., 2010; Braga et al., 2016). Os teores de CBM em solos tropicais, mensurados pelo método da fumigação-extração, variam de 159 a 1.447 $mg\ C\ kg^{-1}$ solo, dependendo da cobertura vegetal considerada (Pfenning et al., 1992; Feigl et al., 1995; Geraldine et al., 1995; Luizão et al., 1999; Moreira & Malavolta, 2004). Porém, os trabalhos nem sempre utilizam os mesmos fatores de correção. Ademais, não temos na literatura dados comparativos de RBS em áreas contaminadas por este tipo de resíduo industrial. Considerando que o CBM foi inferior na área B frente à área A, é possível que a presença do contaminante possa causar perturbação no metabolismo dos microrganismos, fazendo com que estes consumam mais carbono ao invés de imobilizá-los em suas células; ocasionando instabilidade no fluxo desse elemento no solo (Khan et al., 2007).

Melloni & Silva (2001), estudando o efeito do resíduo siderúrgico pó de aciaria elétrica sobre a microbiota

do solo, verificaram que houve uma redução de CBM bem como no carbono do solo, porém estes resultados variaram entre os tipos de solo utilizados. Andrade & Silveira (2004) observaram a redução no CBM com a adição de chumbo ao solo e concluíram que este metal proporciona efeito negativo, com redução da biomassa, indicando que haveria uma menor quantidade de C sendo utilizado pelas populações microbianas.

Considerando as reduções em todos os parâmetros microbiológicos mensurados e as alterações nos parâmetros químicos do solo, decorrentes da presença do pó de exaustão, os índices qCO_2 e $qMic$ apontam para uma baixa eficiência de uso do carbono pela comunidade microbiana, com redução de reservas de compostos orgânicos e, por fim, a inibição da atividade microbiana, demonstrando que a área B apresenta um nível de estresse superior ao da área A.

Altas taxas de qCO_2 , podem ser um indicativo de perdas de C, seja por ação antrópica ou natural. Os valores mais altos de qCO_2 na área B durante o período chuvoso refletem uma alta demanda de manutenção de carbono. Se o sistema do solo não puder reabastecer o carbono perdido pela respiração, a biomassa microbiana tenderá a diminuir (Anderson & Domsch, 2010). Balota (2017) salienta que valores elevados de qCO_2 , demonstram ambientes menos estáveis, observando nos valores médios na área B (Tabela 2).

Por outro lado, os valores mais altos de $qMic$ na área A podem ser um indicativo de maior reserva do COT. A relação CBM e COT demonstra a eficiência dos microrganismos em utilizar os compostos orgânicos, pois áreas com baixa atividade microbiana apresentam baixos valores de $qMic$, indicando menor reserva de compostos orgânicos (Carneiro et al., 2009; Silva et al., 2010).

Conclusões

A respiração basal do solo (RBS), o carbono de biomassa microbiana (CBM) e os quocientes metabólico (qCO_2) e microbiano ($qMic$) se apresentaram como sensíveis indicadores de estresse em ambiente sob influência de atividade siderúrgica. Embora existam efeitos naturais sobre a atividade microbiana decorrentes da sazonalidade e da dinâmica particular de ambientes tropicais, além dos efeitos induzidos pela manutenção do talude na área B, o alto valor de pH e a baixa umidade do solo, associados aos baixos valores dos atributos

microbiológicos do solo RBS, CBM e $qMic$, apontam para a contribuição do resíduo siderúrgico pó de exaustão na redução da atividade microbiana, resultando na diminuição das reservas de carbono do solo.

É importante ressaltar que a utilização de outras técnicas de avaliação da atividade microbiana e a otimização dos fatores de correção poderão oferecer novas informações sobre a dinâmica do C em solos tropicais contaminados por resíduos siderúrgicos.

Agradecimentos

Agradecemos a Siderúrgica Norte Brasil S/A (SINOBRAS) e a Fundação Zoobotânica de Marabá (FZM) pela disponibilização das áreas para estudo e suporte durante as coletas. Agradecimento especial à Gerente de Sustentabilidade da SINOBRAS S/A, Junimara Sarmiento Chaves pelo apoio e viabilização das etapas de coletas nas dependências da empresa.

Referências

- Anderson, J. P. E. & Domsch, K. H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 10, n. 3, p. 215-221, 1978. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8).
- Anderson, T. H. & Domsch, K. H. Soil microbial biomass: the eco-physiological approach. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2039-2043, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.06.026>.
- Anderson, T. H. & Domsch, K. H. The metabolic quotient of CO_2 (qCO_2) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental condition, such as pH, on the microbial of forest soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 3, p. 393-395, 1993. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90140-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90140-7).
- Andrade, S. A. L. D. & Silveira, A. P. D. D. Biomassa e a atividade microbiana do solo sob influência de chumbo e da rizosfera da soja micorrizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 12, p. 1191-1198, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001200005>.
- Araújo, A. S. F. & Monteiro, R. T. R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, v. 23, n. 3, p. 66-75, 2007.
- Azcon-Aguilar, C. & Barea, J. M. Nutrient cycling in the mycorrhizosphere. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 15, n. 2, p. 372-396, 2015. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162015005000035>.
- Balota, E. L. **Manejo e qualidade biológica do solo**. Londrina: Midiograf, 2017. 280 p.
- Barros, J. D. S. Contribuições da matéria orgânica do solo para mitigar as emissões agrícolas de gases de efeito estufa. **Polêmica**, v. 12, n. 2, p. 341-351, 2013. <https://doi.org/10.12957/polemica.2013.6436>.

- Barros, Y. J. et al. Indicadores de qualidade de solos em área de mineração e metalurgia de chumbo. I – microrganismos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1397-1412, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000400036>.
- Bernardo, S. et al. **Manual de irrigação**. 8. ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 625 p.
- Bol, R. et al. Fluxos de fósforo dissolvido e coloidal em ecossistemas florestais: um ponto quase cego na pesquisa de ecossistemas. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 179, p. 425-438, 2016. <https://doi.org/10.1002/jpln.201600079>.
- Braga, R. M. et al. Biomassa e atividade microbiana sob diferentes coberturas florestais. **Cerne**, v. 22, n. 2, p. 137-144, 2016.
- Brohon, B. et al. Complementarity of bioassays and microbial activity measurements for the evaluation of hydrocarbon-contaminated soils quality. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 33, n. 7-8, p. 883-891, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(00\)00234-0](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00234-0).
- Bru, D. et al. Determinants of the distribution of nitrogen-cycling microbial communities at the landscape scale. **The ISME Journal**, v. 5, n. 3, p. 532-542, 2011. <https://doi.org/10.1038/ismej.2010.130>.
- Cardoso, E. J. B. N. & Andreote, F. D. **Microbiologia do solo**. 2. ed. Piracicaba, SP: Esalq, 2016. 221 p.
- Carneiro, M. A. C. et al. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100016>.
- Carnicer, J. et al. Global biodiversity, stoichiometry and ecosystem function responses to human-induced C–N–P imbalances. **Journal of Plant Physiology**, v. 172, n. 1, p. 82-91, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2014.07.022>.
- Chaer, G. M. & Tótola, M. R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1381-1396, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600016>.
- Dilly, O. et al. Soil micro-biological indicators separated land use practices in contrast to abiotic soil properties at the 50 km scale under summer warm Mediterranean climate in northern Italy. **Ecological Indicators**, v. 84, p. 298-303, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.013>.
- Diniz, L. T. et al. Alterações microbianas e químicas de um gleissolo sob macaúbeiras nativas em função da variação sazonal e espacial. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3, p. 750-762, 2014.
- Dornelles, H. D. S. et al. Biomassa e atividade microbiana de solos com aplicação de resíduo sólido urbano e dejetos líquidos de suínos. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Online)** n. 44, p. 18-26, 2017. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820170046>.
- Elser, J. Phosphorus: a limiting nutrient for humanity? **Current Opinion in Biotechnology**, v. 23, p. 833-838, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.03.001>.
- Espindola, J. A. A. A. et al. Flutuação sazonal da biomassa microbiana e teores de nitrato de amônio de solo coberto com *Paspalum notatum* em um agrossistema. **Floresta e Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 104-113, 2001.
- Fan, J. Seasonal dynamics of soil nitrogen availability and phosphorus fractions under urban forest remnants of different vegetation communities in Southern China. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 13, p. 576-585, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2014.03.002>.
- Feigl, B. J. et al. Soil microbial biomass in Amazonian soils: evaluation of methods and estimates of pool sizes. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 27, n. 11, p. 1467-1472, 1995. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00063-K](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00063-K).
- Fraga, M. E. et al. Interação microrganismo, solo e flora como condutores da diversidade na Mata Atlântica. **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, n. 4, p. 857-865, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062012000400015>.
- Geraldes, A. P. A. et al. Biomassa microbiana de solo sob pastagens na Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 55-60, 1995.
- Gomes, M. A. F. & Filizola, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 8 p.
- Grilo, F. F. et al. Caracterização e adição de poeira de aciaria elétrica em ferro-gusa. **Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 3, p. 301-307, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672013000300006>.
- Guimarães, N. D. F. et al. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes sistemas de cultivo do cafeeiro. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 34-44, 2017. <https://doi.org/10.19084/RCA16041>.
- Gülser F. & Erdoğan E. The effects of heavy metal pollution on enzyme activities and basal soil respiration of roadside soils. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 145, n. 1-3, p. 127-133, 2008. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-0022-7>.
- Hoffmann, B. R. et al. Efeito do manejo do solo no carbono da biomassa microbiana. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 168-178, 2018.
- IAB. Instituto Aço Brasil. **Relatório de sustentabilidade 2018**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://institutoacobrasil.net.br/site/>. Acesso em: 26 out. 2019.
- Insam, H. Developments in soil microbiology since the mid 1960. **Geoderma**, v. 100, n. 3-4, p. 389-402, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00029-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00029-5).
- Jackson, M. L. Analisis químico de suelos. **Omega**, v. 631, n. 42, p. 662, 1982.
- Jenkinson, D. S. & Powlson, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil—I. Fumigation with chloroform. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 8, n. 3, p. 167-177, 1976. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(76\)90001-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(76)90001-8).
- Jeyakumar, S. P. et al. Nutrient cycling at higher altitudes. In: Goel R. et al. (ed.). **Microbiological advancements for higher altitude agro-ecosystems & sustainability**. Singapore: Springer, 2020. https://doi.org/10.1007/978-981-15-1902-4_15.
- Kaschuk, G. et al. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 1, p. 1-13, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.020>.

- Khan, K. S. et al. Sources of heavy metals and their long-term effects on microbial C, N and P relationships in soil. **Water Air Soil Pollut**, v. 181, p. 225-234, 2007. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9295-7>.
- Kızılkaya, R. et al. Microbiological characteristics of soils contaminated with heavy metals. **European Journal of Soil Biology**, v. 40, n. 2, p. 95-102, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2004.10.002>.
- Lad, R. J. & Samant, J. S. Impact of bauxite mining on soil: a case study of bauxite mines at Udgiri, Dist-Kolhapur, Maharashtra State, India. **International Research Journal of Environment Sciences**, v. 4, n. 2, p. 77-83, 2015.
- Lambais, M. R. et al. Diversidade microbiana nos solos: definindo novos paradigmas. In: Vidal-Torrado, P. et al. (ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 43-84.
- Lourente, E. R. P. et al. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 20-28, 2011. <https://doi.org/10.5216/pat.v41i1.8459>.
- Luizão, R. C. C. et al. Mudanças na biomassa e nas transformações de nitrogênio do solo em uma sequência de idades de pastagens após derrubada e queima da floresta na Amazônia Central. **Acta Amazonica**, v. 29, p. 43-56, 1999. <https://doi.org/10.1590/1809-43921999291056>.
- Machado, L. V. et al. Fertilidade e compartimentos da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo. **Coffee Science**, v. 9, n. 3, p. 289-299, 2014.
- Marcin, C. et al. Diversity of microorganisms from forest soils differently polluted with heavy metals. **Applied Soil Ecology**, v. 64, p. 7-14, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.11.004>.
- Medeiros, E. V. et al. Absolute and specific enzymatic activities of sandy entisol from tropical dry forest, monoculture and intercropping areas. **Soil and Tillage**, v. 145, p. 208-215, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.09.013>.
- Melloni, R. & Silva, F. A. D. M. Pó de aciaria elétrica na microbiota do solo e no crescimento de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 12, p. 1547-1554, 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001001200012>.
- Moreira, A. & Malavolta, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 1103-1110, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100008>.
- Moreira, F. M. S. & Siqueira, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras: UFLA, 2006. 729 p.
- Pfenning, L. et al. Os métodos da fumigação-incubação e fumigação-extração na estimativa da biomassa microbiana de solo da Amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, p. 31-37, 1992.
- Piao, H. C. et al. Seasonal changes of microbial biomass carbon related to climatic factors in soil from karst areas of southwest China. **Biology and Fertility of Soils**, v. 30, n. 4, p. 294-297, 2000. <https://doi.org/10.1007/s003740050006>.
- Quoos, J. H. et al. Gerador de Triângulo Textural. 2011.
- Raij, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.
- Raimam, M. P. & Albuquerque, A. R. **Relatório de atividades II: pó de exaustão no solo: um teste de lixiviação seguido de avaliação do pH**. Belém, PA: Laboratório de Bioprodutos e Energia da Biomassa da UEPA, 2019.
- Raiol, J. A. **Perspectivas para o meio ambiente urbano: GEO Marabá**. Belém, PA, 2010. 136 p.
- Reis, D. A. et al. Resistência tênsil de agregados e compressibilidade de um solo construído com plantas de cobertura em área de mineração de carvão em Candiota, RS. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 669-678, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200031>.
- Ren, C. et al. Differential responses of soil microbial biomass and carbon-degrading enzyme activities to altered precipitation. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 115, p. 1-10, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.08.002>.
- Rocha, L. M. **Atributos químicos e microbiológicos do solo sob áreas de agricultura e mata nativa**. 2018. 80 f. Dissertação de Mestrado em Agronomia - Universidade Estadual do Norte do Paraná, Campus Luiz Meneghel, Bandeirantes.
- Sá, J. C. M. et al. Soil carbon fractions and biological activity based indices can be used to study the impact of land management and ecological successions. **Ecological Indicators**, v. 84, p. 96-105, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.029>.
- Santos, T. E. B. et al. Comportamento da comunidade microbiana no sistema silviagrícola na região de cerrado. **Revista Agroecologia**, v. 9, n. 2, p. 18-27, 2018. <https://doi.org/10.12971/2179-5959/agroecologia.v9n2p18-27>.
- Silva, M. C. et al. Characterisation of electric arc furnace dust generated during plain carbon steel production. **Ironmak. Steelmak**, v. 35, n. 4, p. 315-320, 2008. <https://doi.org/10.1179/030192307X232936>.
- Silva, R. R. D. et al. Biomassa e atividade microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo na região fisiográfica campos das vertentes - MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 5, p. 1585-1592, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500011>.
- Siqueira, M. G. et al. Respiração do solo em sistemas de manejo no sudoeste da Amazônia. In: Steiner, F. & Zuffo, A. M. **Elementos da natureza e propriedades do solo**. v. 6. Ponta Grossa: Atena, 2018. p. 95-106.
- Souza, C. C. B. et al. Diagnóstico ambiental da poluição dos solos no bairro Volta Grande IV, Volta Redonda - RJ. **Cadernos UniFOA**, v. 11, n. 30, p. 13-22, 2016. <https://doi.org/10.47385/cadunifoa.v11.n30.348>.
- Stacey, N. E. et al. Composted biosolids for golf course turfgrass management: Impacts on the soil microbiome and nutrient cycling. **Applied Soil Ecology**, v. 144, p. 31-41, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.06.006>.
- Teixeira, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

Villani, F. T. et al. Microbial carbon, mineral-n and soil nutrients in indigenous agroforestry systems and other land use in the Upper Solimões Region, Western Amazonas State, Brazil. **Agricultural Sciences**, v. 8, p. 657-674, 2017. <https://doi.org/10.4236/as.2017.87050>.

Xu, Y. et al. Microbial functional diversity and carbon use feedback in soils as affected by heavy metals. **Environment International**, v. 125, p. 478-488, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.071>.

Zhu, X. et al. Regulation of soil phosphorus availability and composition during forest succession in subtropics. **Forest Ecology and Management**, v. 502, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119706>.