

Influência da textura do solo receptor e das condições climáticas e ambientais na taxa e fração de mineralização da matéria orgânica no solo

Influence of the receiving soil texture and climatic and environmental conditions on the rate and fraction of mineralization of organic matter in the soil

Viviana Solano Ramírez^{1*} , Antonio Teixeira de Matos^{1†} 

RESUMO

No presente estudo, é apresentada uma revisão de literatura referente aos fatores de influência do lodo de esgoto sanitário na mineralização da matéria orgânica quando ele é aplicado no solo, com foco na influência da textura do meio receptor e das condições climáticas e ambientais. Ao serem comparados os resultados de pesquisas realizadas sob condições de laboratório e condições de campo (climas tropical e temperado), conduziu-se a haver diferenças consideráveis nos valores das taxas e frações de mineralização da matéria orgânica de diversos resíduos orgânicos, o que indica a influência das condições climáticas e ambientais nesse processo. Existem, entretanto, lacunas no que se refere à influência das características do solo receptor, principalmente da textura, no processo de mineralização da matéria orgânica. Assim, torna-se necessária a condução de pesquisas que possibilitem estimativas das taxas e frações de mineralização em função da textura e das condições climáticas e ambientais locais.

Palavras-chave: taxa de mineralização; matéria orgânica; resíduos de alimentos; adubação orgânica.

ABSTRACT

This study presented a literature review on the factors influencing the mineralization of organic matter from the sewage sludge, when applied to the soil. It focuses on the influence of the receiving soil texture and climatic and environmental conditions which affect this process. When comparing the results of experiments carried out under laboratory and field conditions (for both tropical and temperate climates), it was concluded that there are considerable differences in the values of organic matter mineralization rates and fractions for different organic wastes, indicating the influence of the local climate and environmental conditions in this process. However, important knowledge gaps remain concerning the influence of the receiving soil characteristics, particularly its texture, in the process of organic matter mineralization. Thus, it is necessary to conduct research that allows the estimation of the mineralization rates and fractions based on the soil texture and the local climatic and environmental conditions.

Keywords: mineralization rate; organic matter; garbage; organic fertilizer.

INTRODUÇÃO

Sabe-se que não é possível garantir a segurança na disponibilidade de alimentos para a população mundial apenas com o uso de fertilizantes químicos convencionais (INYINBOR *et al.*, 2019). Em vista do iminente esgotamento das fontes minerais de fertilizantes (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009; LEMA; SUAREZ, 2017; PRITCHARD *et al.*, 2010), a investigação mundial referente à conservação e à reciclagem de nutrientes tem grande importância. O aproveitamento agrícola de fontes alternativas de nutrientes é essencial (SHARMA *et al.*, 2017), além da otimização de práticas agrícolas que possibilitem o melhor aproveitamento dos fertilizantes (INYINBOR *et al.*, 2019).

A alternativa de disposição de resíduos orgânicos em terras agrícolas possibilita o retorno de nutrientes à cadeia alimentar (BRATINA *et al.*, 2016) e a

substituição total ou parcial dos fertilizantes químicos (MEHROTRA; KUNDU; SREEKRISHNAN, 2016), principalmente do fósforo, um nutriente essencial no crescimento das plantas e que, em diversas pesquisas, tem sido apontado como o de mais rápido esgotamento de suas fontes minerais (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009). No entanto, a aplicação desses resíduos em doses inadequadas pode concorrer para a degradação do meio ambiente, além de possível contaminação da cadeia alimentar (SHARMA *et al.*, 2017). Sendo assim, são necessários o desenvolvimento de investigação e o estabelecimento de regulações ambientais adequadas para sua aplicação no solo, de forma que sejam trazidos os maiores benefícios e os menores riscos ao sistema solo-planta-pessoa (AHMAD; AHMAD; ALAM, 2016; MATOS; MATOS, 2017). Entre os conhecimentos necessários para realizar o adequado aproveitamento agrícola de resíduos orgânicos está a ciência da taxa

¹Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte (MG), Brasil.

*Autor correspondente: solanoramirezviviana@gmail.com

[†]in memoriam

Conflitos de interesse: os autores informam não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Programa de Estudantes-Convênio de Pós-Graduação (PEC-PG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Recebido: 06/04/2020 - **Aceito:** 01/06/2021 - **Reg. ABES:** 20200122

e da fração de mineralização da matéria orgânica que os constitui, pois elas estão estreitamente relacionadas à taxa de disponibilização de nutrientes no solo. A disponibilização de alguns nutrientes, como o nitrogênio total e o carbono orgânico, seguem um comportamento semelhante ao da mineralização da matéria orgânica no solo (MATOS; MATOS, 2017), de forma que as taxas de disponibilização do carbono orgânico total, do carbono facilmente oxidável e do nitrogênio total podem ser adotadas como estimativas da taxa de mineralização da matéria orgânica.

Apesar de serem fonte de diversos nutrientes, resíduos orgânicos têm no nitrogênio um dos constituintes de maior interesse, tendo em vista sua possível transformação em nitrato e os riscos que esse ânion proporciona à qualidade das águas subterrâneas. Assim, é fundamental que a quantidade de nitrogênio fornecida pelos resíduos orgânicos seja suficiente para evitar deficiências nos cultivos, porém ela não pode ser excessiva pelo motivo já referido. Compreender a dinâmica dos nutrientes em solos adubados com resíduos orgânicos é fundamental para a determinação de doses de aplicação adequadas (RIGBY *et al.*, 2016).

Diversos estudos indicam a importância de se considerarem a textura, o conteúdo de matéria orgânica e a granulometria do solo na definição da dose a ser aplicada de resíduos orgânicos no solo (RIGBY *et al.*, 2016; SANDOVAL-ESTRADA *et al.*, 2010). Entretanto, grande parte das investigações, referente às taxas e frações de mineralização, tem sido realizada sob condições de clima temperado ou sob condições experimentais de laboratório, de modo que permanecem incertezas em relação à dinâmica da matéria orgânica quando em condições de campo e de clima tropical.

Entre os resíduos orgânicos utilizados como adubação, pode-se mencionar o lodo de esgoto sanitário. O uso agrícola do lodo de esgoto sanitário tem sido amplamente estudado graças a sua composição química e suas características. É um material rico em nitrogênio, carbono e fósforo, e sua composição possibilita seu uso como adubo de culturas agrícolas. Embora os benefícios do uso agrícola do lodo de esgoto sanitário sejam inúmeros, a aplicação de doses inadequadas pode alterar e causar danos a algumas características e propriedades do solo (SRIVASTAVA *et al.*, 2016); ou seja, como todo resíduo orgânico utilizado como adubação, a correta dose de aplicação é fundamental para aumentar os benefícios e diminuir os riscos ao meio ambiente (MATOS; MATOS, 2017).

Neste trabalho, objetiva-se apresentar uma revisão das pesquisas relativas à influência do solo receptor e das condições climáticas e ambientais na taxa e na fração de mineralização da matéria orgânica quando aplicados resíduos orgânicos, mais especificamente lodo de esgoto sanitário, no solo. A revisão foi realizada mediante busca e seleção de artigos publicados entre os anos 2000 e 2020, nas plataformas Scopus e *Scientific Electronic Library Online* (SciELO), utilizando-se as palavras-chave: lodo de esgoto sanitário, disponibilização de nitrogênio, taxa de mineralização, textura do solo e matéria orgânica.

Mineralização da matéria orgânica contida em resíduos orgânicos

Mineralização da matéria orgânica e a disponibilização do nitrogênio

Os elementos químicos podem se encontrar, no solo, sob formas disponíveis ou não disponíveis para as plantas. Um elemento químico é considerado disponível quando está em sua forma mineral, como íon, enquanto os que formam parte de cadeias orgânicas apenas serão disponibilizados à medida que a matéria orgânica for mineralizada (MATOS; MATOS, 2017).

A gestão do nitrogênio contido em resíduos orgânicos é, no entanto, tema que tem gerado inúmeras pesquisas (PAULA *et al.*, 2013; PU *et al.*, 2012; RIGBY *et al.*, 2009, 2016), principalmente em razão de seu complexo comportamento no sistema solo-resíduo-plantas e das perdas que se tem desse nutriente para o ar e a água (ELDRIDGE *et al.*, 2008). Em virtude das grandes perdas de nitrogênio do solo, a eficiência de seu uso nos cultivos é baixa, de aproximadamente 40% de suas formas minerais (KADER *et al.*, 2013). Além disso, embora numerosos estudos tenham sido realizados tanto na área agrícola como na ambiental, para compreender essa dinâmica, ainda existem incertezas em razão da complexa predição de seu comportamento e dos múltiplos fatores envolvidos no processo (KADER *et al.*, 2013).

Para a reposição das já comentadas perdas do nitrogênio, tem sido comum a prática de superdosagem, que conduz ao aumento dos teores de nitrato no solo e nas águas subterrâneas (MILLER *et al.*, 2019). A contaminação das águas subterrâneas é resultado da ação de diversos fatores, entre eles a carga de nitrogênio, que está associada à dose de resíduo orgânico aplicada, além de índice pluviométrico, tipo de solo, tipo de cultura implantada e geologia do local (RIGBY *et al.*, 2016).

Portanto, a taxa e a fração de mineralização do resíduo orgânico são variáveis importantes na definição das doses de sua aplicação no solo. Conhecer a fração mineralizável da matéria orgânica minimiza o risco de se aplicarem macro e micronutrientes em excesso ou, pelo contrário, em quantidade insuficiente (PAULA *et al.*, 2013).

Fatores de influência das taxas de mineralização da matéria orgânica no solo

Conhecer a dinâmica da mineralização da matéria orgânica é fundamental para a adequada adubação com lodo de esgoto sanitário; porém existem desafios para determinar as taxas e frações de mineralização desse material graças à quantidade de fatores que exercem uma influência no processo. Os fatores de influência na mineralização da matéria orgânica contida em resíduos orgânicos podem ser agrupados em três aspectos, associados às características: (i) do resíduo; (ii) das condições ambientais; e (iii) do solo.

Com respeito à influência do tipo de resíduo, em várias pesquisas (CARNEIRO; SILVA; MUNIZ, 2013; CORRÊA; WHITE; WEATHERLEY, 2006; FIGUEROA-BARRERA *et al.*, 2012; MALUF *et al.*, 2015; PAULA *et al.*, 2013) tem sido utilizada ampla variedade de resíduos orgânicos (esterco, lodo de esgoto, composto de lixo, resíduos de culturas, entre outros) a fim de se determinar sua influência na taxa de mineralização da matéria orgânica e, principalmente, identificar quais características dos materiais interferem no processo, características estas que podem se tornar preditores da dinâmica de mineralização da matéria orgânica. O tipo de resíduo tem influência no processo em consequência de características como teor de nitrogênio, teor de carbono, relação carbono/nitrogênio (C/N) e qualquer outro atributo que represente a labilidade da matéria orgânica (CARNEIRO; SILVA; MUNIZ, 2013; PAULA *et al.*, 2013; MALUF *et al.*, 2015); porém, em algumas pesquisas (MALUF *et al.*, 2015; CARNEIRO; SILVA; MUNIZ, 2013), o teor de nitrogênio contido nos resíduos é mencionado como o melhor preditor da mineralização da matéria orgânica. Sugere-se que, além das formas de C lábeis e as formas fúlvicas de N, também interferem os teores e a capacidade dos polifenóis em complexar proteína (CHACÓN *et al.*, 2011).

No caso do lodo de esgoto sanitário, foco deste artigo, a mineralização da matéria orgânica é influenciada: pelo nível de estabilização, digestão e tratamento

do material, ou seja, pelo tipo de lodo de esgoto sanitário (RIGBY *et al.*, 2016); pelos teores de carbono e nitrogênio; pela relação C/N; e pela dose do lodo de esgoto sanitário aplicada no solo (HERNÁNDEZ *et al.*, 2002; RIGBY *et al.*, 2009; MORETTI; BERTONCINI; ABREU-JUNIOR, 2013; SILVA; MATOS; MATOS, 2019).

As condições ambientais do local também exercem influência no processo de mineralização; fatores como as temperaturas do ar, as precipitações e a umidade do ar têm sido apontados como importantes no processo de mineralização (DOUBLET *et al.*, 2011; RIGBY *et al.*, 2009, 2016). Nesse tópico, têm sido realizadas pesquisas sob condições de laboratório ou condições controladas e sob condições de campo, as quais são retomadas na seção seguinte.

Quanto aos aspectos relacionados ao solo ao qual é realizada a incorporação do resíduo sólido, podem-se mencionar aspectos como textura, granulometria, conteúdo de matéria orgânica e pH como fatores de influência no processo (DOUBLET *et al.*, 2011; HALL; CARLTON-SMITH; DAVIS, 1987; RIGBY *et al.*, 2009, 2016). Neste artigo, em itens posteriores, explora-se de forma mais aprofundada a influência da textura do solo no processo de mineralização da matéria orgânica.

Em função dos múltiplos fatores envolvidos nesse processo, ainda existem lacunas e incertezas no que se refere à mineralização da matéria orgânica e à disponibilização do nitrogênio presente em resíduos orgânicos.

Influência das condições climáticas e ambientais na mineralização da matéria orgânica no solo

Estudos realizados sob condições de laboratório

Existem diferenças entre os valores de nitrogênio orgânico mineralizável quantificados em condições de laboratório e os quantificados sob condições de campo. Estudos realizados para comparar as taxas de mineralização de matéria orgânica

em condições de campo e condições de laboratório têm determinado que existem diferenças nos valores de nitrogênio e carbono quantificados sob as duas referidas condições (PEREIRA *et al.*, 2015). As diferenças são explicadas pelo estresse e pelo tempo de adaptação dos microrganismos às condições de laboratório (temperatura, umidade relativa, pressão e concentração de gases no ar), bem como pela pouca interação do resíduo com macro e mesorganismos do solo em condições de laboratório (PEREIRA *et al.*, 2015).

No que se refere à mineralização da matéria orgânica, as indicações são de que experimentos em escala de laboratório são adequados apenas para estudos exploratórios. Entretanto, diante da complexidade da instalação de experimentos em campo, a maioria dos estudos realizados é conduzida em condições de laboratório, excluindo vários fatores que têm influência importante no processo (PEREIRA *et al.*, 2015). Os experimentos realizados sob condições de campo são apontados como necessários para se obterem taxas e frações de mineralização confiáveis para a aplicação de lodo de esgoto sanitário (DINIZ *et al.*, 2016; RIGBY *et al.*, 2016).

Na Tabela 1 estão apresentados estudos realizados sob condições de laboratório, a fim de determinar as frações de mineralização da matéria orgânica e a disponibilização do nitrogênio contido em lodo de esgoto sanitário.

As condições ambientais em que os experimentos são conduzidos têm forte influência nas taxas e frações de mineralização e na disponibilização de nitrogênio no solo. As pesquisas realizadas sob condições de laboratório têm sido adequadas para estimar as frações de mineralização da matéria orgânica de lodo de esgoto válidas apenas para as condições controladas; isso porque essas frações podem ser diferentes quando o lodo de esgoto é aplicado em condições de campo. É importante ressaltar que, na maior parte das pesquisas apresentadas na Tabela 1, as frações de mineralização (com exceção de Carneiro *et al.* [2013] e Giacomini *et al.* [2015]) não passaram de 50%.

Tabela 1 – Frações de mineralização do nitrogênio e carbono orgânico contido em lodo de esgoto sanitário, determinadas sob condições de laboratório

Características do material orgânico incorporado	Características do solo	Principais características do experimento	Frações de mineralização ⁽¹⁾	Referência
- Lodo anaeróbio e aeróbio - Dose: 30 g.kg⁻¹ de lodo aeróbio e 50 g.kg⁻¹ de lodo anaeróbio	- Textura arenosa - Textura argilosa	- Condições de laboratório - Duração: 140 dias - Temperatura: 25°C	N _{min} : 18,5 – 40,9%	Hernández <i>et al.</i> (2002)
- Lodo anaeróbio, desaguado - Dose: 400 kg.ha⁻¹ de N - Relação C/N⁽²⁾: 9; pH: 8,1	Textura média	- Condições de laboratório - Duração: 182 dias - Temperatura: 10°C e 20°C	N _{min} a 10°C: 10% N _{min} a 20°C: 23%	Wang <i>et al.</i> (2003)
- Lodo compostado e lodo seco termicamente - Dose: 80.000 kg.ha⁻¹ de lodo - Relação C/N: 7,6; pH: 7,1	- Textura média arenosa - pH: 5,7 - MO⁽³⁾: 7,2 g.kg⁻¹	- Condições de laboratório - Duração: 60 dias - Temperatura: 28°C	N _{min} : 3 – 25%	Fernández <i>et al.</i> (2007)
- Lodo de esgoto - Dose: 0,1 g.kg⁻¹ de N - Relação C/N: 7,0 – 8,7	- Textura média, pH: 5,4 - Textura argilosa, pH: 4,3 - Areia, pH: 6,2	- Condições de laboratório - Duração: 270 dias - Temperatura: 24 ± 4°C	C _{min} : 50 – 100%	Carneiro <i>et al.</i> (2013)
- Lodo aeróbio - Dose: 30.000 kg.ha⁻¹ de lodo - Relação C/N: 5,4; pH: 6,8	- Textura arenosa - pH: 5,3 - MO: 17 g.kg⁻¹	- Condições de laboratório - Duração: 110 dias - Temperatura: 25°C	N _{min} : 56%	Giacomini <i>et al.</i> (2015)
- Lodo de esgoto anaeróbio - Dose: 300 kg.ha⁻¹ de N - Relação C/N: 6,8	Textura argilosa, pH: 4,6	- Condições de laboratório - Duração: 140 dias - Temperatura: 26 ± 2°C	N _{min} : 19,3 – 22,8 %	Pinheiro (2017)
- Lodo de esgoto - Dose: 5, 15, 30% de lodo (matéria seca)	Solo preto (CK)	- Condições de laboratório - Duração: 50 dias - Temperatura: 25°C	N _{min} : 32 – 50%	Zhang <i>et al.</i> (2017)

(1) taxa de mineralização média indicada nesses estudos; (2) C/N: relação carbono/nitrogênio; (3) MO: matéria orgânica.

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

Estudos realizados sob condições de campo em climas tropical e temperado

Vários autores demonstraram que existem diferenças entre os resultados obtidos em experimentos realizados em regiões de climas temperados e os obtidos em climas tropicais (PU *et al.*, 2012; RIGBY *et al.*, 2016). Essas variações nas taxas e frações de mineralização da matéria orgânica podem ser explicadas pelas diferenças na temperatura, na umidade relativa do ar e na precipitação no local (WANG; KIMBERLEY; SCHLEGELMILCH, 2003). Rigby *et al.* (2016) mostraram que a temperatura do solo tem influência na dinâmica do nitrogênio e, portanto, é possível encontrar valores de mineralização no solo maiores em regiões de clima tropical, o que pode ser atribuído ao favorecimento da atividade microbiana no solo. Na Tabela 2, estão apresentados os principais estudos

identificados na revisão de literatura, realizados em condições de campo e sob diferentes condições climáticas, segundo a classificação realizada por Köppen e Geiger (1965). As regiões de clima temperado caracterizam-se por apresentar temperaturas médias entre 0 e 18°C durante os meses mais frios e superiores a 10°C durante os meses mais quentes (KÖPPEN; GEIGER, 1965). Sob condições de clima temperado, na Inglaterra, Rigby *et al.* (2009) determinaram as taxas e as frações disponibilizadas do nitrogênio em solos adubados com lodo de esgoto sanitário, quantificando-as entre 9,2 e 23,7% do nitrogênio aplicado após 90 dias de monitoramento dos solos (Tabela 2).

Pu *et al.* (2012) determinaram as frações de mineralização, sob condições de campo e na Austrália, utilizando vários tipos de lodo incorporados e

Tabela 2 - Levantamento de pesquisas realizadas sobre as frações de mineralização da matéria orgânica, realizadas sob condições de campo

Local do experimento	Principais condições experimentais e materiais utilizados	FM	Principais lições	Referência
São Paulo, Brasil	• Duração: 6 dias • Aplicação subsuperficial • Dose: 8.090 kg.ha⁻¹ de NT ⁽¹⁾ • Solo de textura argilosa (pH de 5,8) • LAS ⁽⁹⁾	N ⁽⁵⁾ : 76%	• Nos solos tropicais, o alto conteúdo de umidade do solo e as altas temperaturas favorecem a mineralização. • Foram observadas perdas de N por lixiviação.	Vieira, Maia, Teixeira (2005)
Inglaterra	• Duração: 90 dias • Aplicação por incorporação • Dose: 200 - 600 kg.ha⁻¹ de NT ⁽¹⁾ • Areia (pH de 6,8) e argila siltosa (pH de 8,2) • LC ⁽⁸⁾ digerido • P⁽²⁾: > 77 mm⁽³⁾, T⁽⁴⁾: 1 - 7°C	N ⁽⁵⁾ : 9,2 - 23,7%	• Em condições de clima temperado, não parece necessário considerar o tipo de solo na determinação da taxa de mineralização. • Taxas de disponibilização de N menores a 23,7%	Rigby <i>et al.</i> (2009)
Austrália	• Duração: 124 dias • Aplicação por incorporação • Dose: 180 kg.ha⁻¹ de NT • CO⁽⁶⁾ quantificado com analisador LECO CNS-2000 • Quatro tipos de solo • LAN⁽⁷⁾, LC⁽⁸⁾, LAS⁽⁹⁾ digeridos • Período chuvoso e período seco	N _{verão} ⁽⁵⁾ : 37 - 68% N _{inverno} ⁽⁵⁾ : 33 - 43%	N orgânico nos ambientes subtropicais sugere que o biossólido deve ser aplicado em taxas mais baixas que em áreas temperadas.	Pu <i>et al.</i> (2012)
Minas Gerais, Brasil	• Duração: 360 dias • Aplicação por incorporação • Dose: 333 kg.ha⁻¹ de NT • CO quantificado pelo método Walkley-Black • Solo Latossolo Vermelho-Amarelo (pH de 5,7) • LAN digerido • P: 1166,5 mm; T: 19,97°C, UR ⁽¹⁰⁾: 77,4%	CO > 87%	• Maiores taxas de mineralização nos primeiros quatro meses de sua disposição. • Os teores de N estão sujeitos à forte influência de variações climáticas, recomenda-se o monitoramento dos teores de carbono.	Paula <i>et al.</i> (2013)
Minas Gerais, Brasil	• Duração: 131 dias • Dose: 500 kg.ha⁻¹ de NT • CO quantificado pelo método Walkley-Black • Cambissolo Háplico Distrófico Latossólico (pH de 5,52) • LAS digerido	CO > 90%	• Maiores taxas de mineralização nos primeiros 40 dias. • Diferenças estatísticas na taxa de mineralização se a aplicação for incorporada ou superficial.	Diniz <i>et al.</i> (2016)
Itália	• Duração: 22 dias • Dose: 15.000 kg.ha⁻¹ de NT (aplicações prévias durante 8 anos) • CO quantificado pela determinação do CO₂ • Solo de textura franco-limosa (pH de 7,8) • LAN	CO = 240 - 275 mg.kg ⁻¹	• Maiores taxas de mineralização nos solos com aplicações prévias e repetidas de lodo de esgoto. • Maiores taxas de mineralização nos primeiros dias depois da aplicação.	Rossi, Beni (2018)
Minas Gerais, Brasil	• Duração: 215 dias • Dose: 300 kg.ha⁻¹ de NT • CO quantificado com analisador de carbono total • Argissolo Vermelho-Amarelo (pH de 4,61) • LAN digerido • P > 514 mm; T: 20,00°C	CO > 95%	As frações mineralizadas do material orgânico foram consideravelmente superiores aos estabelecidos na Resolução CONAMA 375/2006.	Silva <i>et al.</i> (2019)

FM: frações de mineralização; CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente; (1) NT: nitrogênio total; (2) P: precipitação; (3) estimativa com base nas informações reportadas no artigo; (4) T: temperatura; (5) N: nitrogênio; (6) CO: carbono orgânico; (7) LAN: lodo anaeróbio; (8) LC: torta de lodo tratada com cal; (9) LAS: lodo aeróbio; (10) UR: umidade do ar relativa. Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

quatro tipos de solo durante os períodos de verão, caracterizado por apresentar altas temperaturas e índices pluviométricos, e de inverno, caracterizado por temperaturas mais baixas e menores índices de pluviométricos. Os resultados mostraram que, durante o período de verão, as frações disponibilizadas do nitrogênio foram de 37 a 68%; no entanto, no período de inverno, foram de 33 a 43% (Tabela 2). Os autores concluem que nos climas subtropicais o lodo de esgoto sanitário deveria ser aplicado em doses menores que em climas temperados, como consequência das diferenças entre taxas de mineralização da matéria orgânica nessas regiões. Com isso, também podem existir diferenças sazonais entre as taxas e frações de mineralização em uma mesma região, graças às variações climáticas no ano. Torna-se importante ressaltar que, segundo a classificação realizada por Köppen e Geiger (1965), a Austrália tem clima do tipo tropical dominante, embora algumas regiões do país apresentem clima continental e temperado.

As regiões de clima tropical são características da faixa entre os 23° latitude norte e até os 23° latitude sul, com temperaturas médias superiores aos 18°C (KÖPPEN; GEIGER, 1965). O Brasil é um referencial nas pesquisas referentes à mineralização da matéria orgânica em solos tropicais sob condições de campo, pois a maior parte do país encontra-se em tais condições climáticas. No estudo realizado por Paula *et al.* (2013), foram determinadas taxas de mineralização da matéria orgânica maiores que 87% após o monitoramento de 360 dias de um solo no qual foi incorporado lodo de esgoto sanitário. Entre as principais conclusões desse estudo, encontra-se que, sob condições de campo, os teores de nitrogênio estão sujeitos a forte influência de variações climáticas, recomendando-se, por isso, o monitoramento dos teores de carbono orgânico do solo (Tabela 2).

Diniz *et al.* (2016), ao conduzirem experimentos também sob condições de clima tropical, obtiveram frações de mineralização maiores que 90% após o monitoramento de 131 dias de um solo no qual foi incorporado lodo de esgoto sanitário. Silva *et al.* (2019) quantificaram frações de mineralização superiores a 95% após o monitoramento dos teores de carbono orgânico no solo, por 215 dias, sob condições de campo (Tabela 2).

Pode-se observar que as frações de mineralização obtidas nos estudos realizados no Brasil são superiores às quantificadas em condições de laboratório e clima temperado. Rigby *et al.* (2016) afirmaram que a temperatura do solo tem influência na dinâmica do nitrogênio e, portanto, é possível encontrar valores de fração de mineralização maiores nos solos de regiões de clima tropical, o que se pode atribuir ao favorecimento da atividade microbiana do solo.

Em virtude dos múltiplos fatores que interferem na mineralização da matéria orgânica, os estudos mais recentes (MILLER; GEISSELER, 2018; MILLER *et al.*, 2019) têm utilizado ferramentas estatísticas para determinar quais fatores têm maior relevância nas taxas e frações de mineralização da matéria orgânica do solo e, portanto, deveriam ser necessariamente considerados ao se recomendar o valor a ser utilizado para a fração de mineralização. Miller e Geisseler (2018) realizaram estudo de campo na Califórnia, utilizando 55 tipos de solo, a fim de determinar a influência da temperatura do solo no processo da mineralização da matéria orgânica. Esses autores verificaram que a mineralização aumentou exponencialmente com o aumento na temperatura do solo. Uma das conclusões desse trabalho foi a de que se torna necessário considerar as condições climáticas da região para estimar a taxa e a fração de mineralização do nitrogênio orgânico no solo.

Influência da textura do solo receptor na mineralização da matéria orgânica

O tipo de solo no qual é incorporado o lodo de esgoto sanitário influi na dinâmica da mineralização da matéria orgânica; características como a textura, o pH e o conteúdo de matéria orgânica do solo são apontadas como responsáveis por afetar o processo (RIGBY *et al.*, 2016). A influência do tipo de solo na taxa e na fração de mineralização da matéria orgânica no solo tem sido estudada por vários autores; porém as pesquisas comparam diferentes classes de solo, com várias características contrastantes (a textura, o pH, o conteúdo de matéria orgânica do solo). Em virtude disso, existem conclusões divergentes no que diz respeito à influência do tipo de solo no processo da mineralização da matéria orgânica, tal como apresentado na Tabela 3. Para estudar a influência da textura do solo no processo de mineralização, é recomendável a realização de experimentos sob condições controladas, a fim de se realizar uma comparação focada na textura dos solos utilizados e de se evitar a interferência das condições climáticas e ambientais do local de cada experimento. Entretanto, como discutido no item anterior, os experimentos com condições controladas não permitem a quantificação de frações e taxas de mineralização da matéria orgânica confiáveis para as condições de campo; portanto, a escolha de realizar um experimento sob condições de laboratório ou sob condições de campo deve responder aos objetivos da pesquisa.

Hernández *et al.* (2017) reportaram maior mineralização da matéria orgânica em solos arenosos, explicando que a maior aeração dos solos possibilita o aumento na taxa e na fração de mineralização. Esses resultados são coincidentes com os obtidos por Rigby *et al.* (2009), apesar de que as diferenças entre solos argilosos e arenosos não tenham sido estatisticamente significativas. Nos estudos realizados por Carneiro *et al.* (2013) e Corrêa *et al.* (2006), foram encontrados resultados diferentes, já que os solos argilosos apresentaram frações de mineralização e nitrificação maiores, o que foi atribuído aos maiores conteúdos de matéria orgânica nativa e à maior atividade microbiana no meio. Em outras pesquisas, todavia, não foi identificada influência da textura do solo nas taxas de mineralização obtidas (HECHMI *et al.*, 2020; MALUF *et al.*, 2015).

Essa divergência nos resultados tem gerado pesquisas para se identificarem as características do solo que melhor podem prever a mineralização do material orgânico a ele aportado. Miller *et al.* (2019) realizaram estudo com 57 tipos de solos, visando relacionar as taxas e frações de mineralização do nitrogênio orgânico com as características do solo e utilizando um modelo linear multivariado. Identificou-se uma relação positiva entre o teor de areia dos solos e a mineralização da matéria orgânica, o que sugere que a fração de areia não exerce proteção física sobre a matéria orgânica e, portanto, possibilita sua mais rápida mineralização em relação à da argila. Com base em sua pesquisa, os autores concluíram que, para solos com alto conteúdo de matéria orgânica, os melhores preditores da mineralização são o próprio conteúdo de matéria orgânica, a textura, o conteúdo de nitrogênio e a mineralogia dos solos.

O uso agrícola de lodo de esgoto no Brasil

No Brasil, estima-se uma produção de lodo de esgoto sanitário de 151.724,50 t. ano⁻¹ em termos de massa seca (MACHADO, 2001). Machado (2001) realizou um levantamento de dados sobre a destinação final de lodo de esgoto sanitário no Brasil, segundo o reportado pelas operadoras pesquisadas, e verificou que apenas 5,6% do lodo de esgoto gerado tem destinação agrícola, sendo 44,9% conduzidos e dispostos em aterro sanitário e 49,5% não

Tabela 3 – Levantamento do resultado de pesquisas realizadas sobre a disponibilização do nitrogênio orgânico contido em lodo de esgoto sanitário, em diferentes tipos de solo

Principais características do experimento	Materiais utilizados	N _{orgânico} disponibilizado ⁽¹⁾	Principais conclusões	Referência
- Condições de laboratório - Duração: 140 dias - Dose: 30 g.kg⁻¹ de lodo aeróbio e 50 g.kg⁻¹ de lodo anaeróbio - Temperatura: 25°C	- Solos: Solo arenoso (71% areia, 9% silte, 20% argila) e solo argiloso (36% areia, 33% silte, 31% argila) - Lodos utilizados: LAS⁽²⁾ e LAN⁽³⁾	- Solo arenoso: 29,9 – 40,9% - Solo argiloso: 18,5 – 24,1%	- Maiores taxas de mineralização nos solos arenosos, o que deve ser atribuído, principalmente, à maior áreação nesses solos. - Taxas de mineralização decrescem com o tempo, principalmente depois das primeiras duas semanas, tendo em vista o esgotamento do material mais lábil.	Hernández <i>et al.</i> (2002)
- Condições de laboratório - Duração: 161 dias - Dose: 0 a 80.000 kg.ha⁻¹ de NT⁽⁴⁾ - Temperatura: 25°C	- Solos: solo arenoso (91,5% areia, 3,7% silte, 4,8% argila) e solo argiloso (49,9% argila, 14,5% silte, 35,6% areia) - Composto de LAN	- Solo arenoso: 6,0 – 10,9% - Solo argiloso: 24,6 – 38,1%	- Maiores taxas de mineralização são apresentadas no solo com maior conteúdo de argila. - Maior lixiviação de nitrato foi apresentada no solo com maior conteúdo de argila.	Corrêa <i>et al.</i> (2006)
- Condições de laboratório - Duração: 270 dias - Temperatura: 24°C ± 4°C	- Solos utilizados: solo de textura média, solo de textura argilosa - Lodos utilizados: LAN	- Solo de textura média: 60 mg.kg⁻¹ de N - Solo argiloso: 50 mg.kg⁻¹ de N	- Maiores taxas de mineralização são apresentadas nos solos com maiores teores de matéria orgânica e de argila. - Maior velocidade de mineralização é observada entre 30 e 90 dias.	Carneiro <i>et al.</i> (2013)
- Condições de laboratório - Duração: 84 dias - Temperatura: 25°C	- Solos utilizados: solo arenoso (83,3% areia, 11,5% silte, 5,2% argila) e solo franco-arenoso (59% areia, 27,5% silte, 13,5% argila) - Lodos de esgoto	- Solo arenoso: 60,6 – 72,47 mg.kg⁻¹ de NO₃⁻ - Solo franco-arenoso: 37,4 – 50,05 mg.kg⁻¹ de NO₃⁻	A mineralização da matéria orgânica foi maior no solo arenoso do que no solo franco-arenoso (com maior conteúdo de argila). A diferença não foi significativa para a dose de 40 t.ha⁻¹ de lodo, foi significativa quando aplicada uma dose de 120 t.ha⁻¹.	Hechmi <i>et al.</i> (2020)

(1) taxa de mineralização média indicada nos estudos; (2) LAS: lodos aeróbios; (3) LAN: lodos anaeróbios; (4) NT: nitrogênio total.

Fonte: Elaboração dos autores, 2022.

definidos. Torna-se importante ressaltar que a prática de utilização agrícola do lodo restringe-se, praticamente, à região Sudeste do país, pois se concentra principalmente nos estados de São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul, com as quantidades anuais de 8.500, 8.000 e 3.800 t.ano⁻¹ de ST, respectivamente (SAMPAIO, 2013).

Vários estudos relativos ao aproveitamento agrícola do lodo de esgoto sanitário foram conduzidos no estado do Paraná, onde se estima que 54% do total produzido é utilizado na agricultura. Bittencourt *et al.* (2017) informaram que, no período de 2011 a 2013, o aproveitamento do lodo na agricultura no estado de Paraná forneceu 69% do nitrogênio e 83% do óxido de fósforo demandados pelos cultivos agrícolas da região e, também, proporcionou aos agricultores redução de R\$ 443,28 ha⁻¹ nos gastos com aquisição de fertilizantes e corretivos de acidez para o solo. Segundo Christodoulou e Stamatiadou (2016), a diferença de cenários no mundo, no que se refere ao aproveitamento agrícola de lodo de esgoto sanitário, pode ser atribuída às regulações, as políticas públicas de cada país e à aceitação dos consumidores e produtores.

No Brasil, as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 375/2006 (BRASIL, 2006) e nº 498/2020 (BRASIL, 2020) definem os critérios e procedimentos para a definição da dose de aplicação, com fins agrícolas, de lodo de esgoto sanitário gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário, indicando as taxas e frações de mineralização do material orgânico ou de disponibilização do nitrogênio que devem ser utilizadas no cálculo das doses de aplicação. Existem, no entanto, questionamentos a respeito da validade dessas frações para as condições climáticas e edafológicas brasileiras, já que em

diversos estudos se verificou que as frações de mineralização da matéria orgânica no Brasil são maiores que as indicadas nas referidas resoluções (DINIZ *et al.*, 2016; PEREIRA *et al.*, 2015; MORETTI; BERTONCINI; ABREU-JUNIOR, 2013; PAULA *et al.*, 2013).

Em todos os casos de pesquisas realizadas em condições de campo nas condições climáticas do Sudeste brasileiro, as frações de mineralização anuais foram superiores a 80% (Tabela 2), o que demonstra que as frações de mineralização adotadas na Resolução CONAMA nº 375/2006 não são adequadas para as condições climáticas brasileiras, já que, nessa resolução, as frações anuais de mineralização do lodo de esgoto sanitário têm valores entre 10 e 40%, a depender do grau de estabilização desse resíduo.

CONCLUSÕES

- Os experimentos sob condições controladas mostram-se adequados para o estudo da influência de fatores específicos no processo de mineralização. Contudo, são necessários os experimentos realizados sob condições de campo, pois dificilmente essas condições poderão ser replicadas em laboratório.
- Existem diferenças entre as frações de mineralização determinadas em condições de campo e de laboratório, e nas condições de laboratório essas frações têm sido subestimadas. A condução de maior número de experimentos sob condições de campo é necessária para que se possam determinar taxas e frações de mineralização mais confiáveis.

3. As frações de mineralização obtidas sob condições de clima tropical diferem daquelas estimadas sob condições de clima temperado; assim, é essencial se considerarem as condições climáticas da região para a estimativa da fração de mineralização do nitrogênio orgânico no solo e, com isso, a dose de aplicação do lodo de esgoto sanitário.
4. Pesquisas têm revelado que as frações de mineralização indicadas na Resolução CONAMA nº 375/2006 não estão adequadas para as condições climáticas e ambientais do Brasil, pois os valores obtidos em experimentos conduzidos em condições de campo são muito superiores aos adotados na referida resolução.
5. Considerando-se que as condições climáticas e ambientais têm influência na mineralização da matéria orgânica, as condições climáticas de cada

região devem ser levadas em consideração ao se determinar a fração que será utilizada. No caso do Brasil, recomenda-se realizar comparações de frações de mineralização entre diferentes regiões do país.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Ramírez, V.S.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Recursos, Software, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. Matos, A.T.: Conceituação, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Administração do Projeto, Recursos, Software, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Sustainable management of water treatment sludge through '3R' concept. *Journal of Cleaner Production*, v. 124, p. 1 – 13, 2016. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.073>
- BITTENCOURT, S.; AISSE, M.M.; SERRAT, B.M. Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 22, n. 6, p. 1129 – 1139, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017156260>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2006) Resolução CONAMA nº. 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2006. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF: Imprensa Oficial, 30 de agosto de 2006. Seção 1. p.141 – 6, 2006.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. (2020) Resolução CONAMA nº. 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos. Ministério do Meio Ambiente: CONAMA, 2020. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF: Imprensa Oficial, 21 de agosto de 2020. Seção 1. p.161 – 6, 2020.
- BRATINA, B.; SORGO, A.; KRAMBERGER, J.; AJDNIK, U.; FRAS, L.; EKART, J.; SAFARI, R. From municipal/industrial wastewater sludge and FOG to fertilizer: a proposal for economic sustainable sludge management. *Journal of Environmental Management*, v. 183, p. 1009 – 1025, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.063>
- CARNEIRO, D.O.; SILVA, C.A.; MUNIZ, J.A. Mineralização de nitrogênio em latossolos adubados com resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 1, p. 715 – 725, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300018>
- CHACÓN, E.; MENDONÇA, E.; SILVA, R.; LIMA, P.; SILVA, I.; CANTARUTTI, R. Decomposição de fontes orgânicas e mineralização de formas de nitrogênio e fósforo. *Revista Ceres*, v. 58, n. 3, p. 373 – 383, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000300019>
- CHRISTODOULOU, A.; STAMATELATOU, K. Overview of legislation on sewage sludge management in developed countries worldwide. *Water Science and Technology*, v. 73, n. 3, p. 453 – 462, 2016. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.521>
- CORDELL, D.; DRANGERT, J.O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, v. 19, n. 2, p. 292 – 305, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009>
- CORRÊA, R.S.; WHITE, R.E.; WEATHERLEY, A.J. Effect of compost treatment of sewage sludge on nitrogen behavior in two soils. *Waste Management*, v. 26, n. 6, p. 614 – 619, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.09.008>
- DINIZ, I.C.C. *Taxa de degradação do material orgânico de lodo de esgoto sanitário no solo*. 2014. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014.
- DINIZ, I.; MATOS, A.; BORGES, A.; AQUINO, J.; MATOS, M. Degradation of sewage sludge compost disposed on the soil. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, v. 36, p. 822 – 829, 2016. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p822-829/2016>
- DOUBLET, J.; FRANCOU, M.; POITRENAUD, B.; HOUOT, S. Influence of bulking agents on organic matter evolution during sewage sludge composting: consequences on compost organic matter stability and N availability. *Bioresource Technology*, v. 102, n. 2, p. 1298 – 1307, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.065>
- ELDRIDGE, S.; CHAN, K.Y.; XU, Z.H.; CHEN, C.R.; BARCHIA, I. Plant-available nitrogen supply from granulated biosolids: implications for land application guidelines. *Australian Journal of Soil Research*, v. 46, n. 5, p. 423 – 436, 2008. <https://doi.org/10.1071/SR07234>
- FERNÁNDEZ, J.M.; PLAZA, C.; HERNÁNDEZ, D.; POLO, A. Carbon mineralization in an arid soil amended with thermally-dried and composted sewage sludges. *Geoderma*, v. 137, n. 3 – 4, p. 497 – 503, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.013>
- FIGUEROA-BARRERA, J.; HERRERA, J.; SALAMANCA, C.; PINZÓN, L. Determinación del nitrógeno potencialmente mineralizable y la tasa de mineralización de nitrógeno en materiales orgánicos. *Temas Agrarios*, v. 17, n. 1, p. 32 – 43, 2012. <https://doi.org/10.21897/ta.v17i1.694>

- GIACOMINI, S.J.; SIMON, V.L.G.; AITA, C.; BASTOS, L.M.; WEILER, D.A.; REDIN, M. Carbon and nitrogen mineralization in soil combining sewage sludge and straw. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 5, p. 1428 – 1435, 2015. <https://doi.org/10.1590/O1000683rbcS20140324>
- HALL, J.E.; CARLTON-SMITH, C.H.; DAVIS, R.D. Field investigations into the manurial value of lagoon-matured digested sewage sludge. *The Journal of Agricultural Science*, v. 109, n. 3, p. 467 – 478, 1987. [10.1017/S0021859600081685](https://doi.org/10.1017/S0021859600081685)
- HECHMI, S.; HAMD, H.; MOKNI, S.; ZOGHLAMI, I.; KHELIL, M.; BENZARTI, S.; HASSEN, A.; JEDIDI, N. Carbon mineralization, biological indicators, and phytotoxicity to assess the impact of urban sewage sludge on two light-textured soils in a microcosm. *Journal of Environmental Quality*, v. 49, p. 460 – 471, 2020. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20011>
- HERNÁNDEZ, F.; MARGNI, M.; NOYOLA, A.; GUERCA-HERNÁNDEZ, L.; BULLE, C. Assessing wastewater treatment in Latin America and the Caribbean: enhancing life cycle assessment interpretation by regionalization and impact assessment sensibility. *Journal of Cleaner Production*, v. 142, p. 2140 – 2153, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.068>
- HERNÁNDEZ, T.; MORAL, R.; PEREZ-ESPINOSA, J. MORENO-CASELLES, J.; PEREZ-MURCIA, C. Nitrogen mineralization potential in calcareous soils amended with sewage sludge. *Bioresource Technology*, v. 83, n. 3, p. 213 – 219, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00224-3](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00224-3)
- INYINBOR, A.; OLUYORI, S.; INYINBOR, P.; EROMOSELE, H. Wastewater conservation and reuse in quality vegetable cultivation: overview, challenges and future prospects. *Food Control*, v. 98, p. 489 – 500, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2018.12.008>
- KADER, M.A.; SLEUTEL, S.; BEGUM, S.; MOSLEHUDD, M.; NEVE, S. de. Nitrogen mineralization in sub-tropical paddy soils in relation to soil mineralogy, management, pH, carbon, nitrogen and iron contents. *European Journal of Soil Science*, v. 64, n. 1, p. 47 – 57, 2013. <https://doi.org/10.1111/ejss.12005>
- KOPPEN, W.; GEIGER, R. *Estudio de climas*. Versión de Pedro Hendrichs. Fondo de Cultura Económica, México, v. 37, 1965.
- LEMA, J.M.; SUAREZ, S. *Innovative wastewater treatment & resource recovery technologies*. London: IWA Publishing, 2017. 690 p.
- MACHADO, F. *A situação brasileira dos biossólidos*. 2001. 282 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Ambiente) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2001.
- MALUF, J.; BARROS, E.; RIBEIRO, I.; NEVES, J.; OLIVEIRA, L. Decomposição de resíduos de culturas e mineralização de nutrientes em solo com diferentes texturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 39, n. 6, p. 1681 – 1689, 2015. <https://doi.org/10.1590/O1000683rbcS20140657>
- MATOS, A.T.; MATOS, M. *Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos*. Viçosa: UFV, 2017. 371 p.
- MEHROTRA, A.; KUNDU, K.; SREEKRISHNAN, T.R. Decontamination of heavy metal laden sewage sludge with simultaneous solids reduction using thermophilic sulfur and ferrous oxidizing species. *Journal of Environmental Management*, v. 167, p. 228 – 235, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.004>
- MILLER, M.; AEGERTER, B.; CLARK, N.; LEINFELDER-MILES, M.; MIYAO, E.; SMITH, R.; WILSON, R.; GEISSELER, D. Relationship between soil properties and nitrogen mineralization in undisturbed soil cores from California agroecosystems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 50, n. 1, p. 77 – 92, 2019. <https://doi.org/10.1080/00103624.2018.1554668>
- MILLER, K.S.; GEISSELER, D. Temperature sensitivity of nitrogen mineralization in agricultural soils. *Biology and Fertility of Soils*, v. 54, n. 7, p. 853 – 860, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1309-2>
- MORETTI, S.M.L.; BERTONCINI, E.I.; ABREU-JUNIOR, C.H. Aplicação do método de mineralização de nitrogênio com lixiviação para solo tratado com lodo de esgoto e composto orgânico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 3, p. 622 – 631, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300008>
- PAULA, J.R.; MATOS, A.T.; MATOS, M.P.; PEREIRA, M.S.; ANDRADE, C.A. Mineralização do carbono e nitrogênio de resíduos aplicados ao solo em campo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 1729 – 1741, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000600029>
- PEREIRA, M.G.; MATOS, A.T.; BORGES, C.A.; NUNES, M.F. Mineralização do resíduo da pupunheira em condições de campo e laboratório. *Engenharia Agrícola*, v. 35, n. 5, p. 918 – 930, 2015. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng-Agricv35n5p918-930/2015>
- PINHEIRO, D. *Mineralização da matéria orgânica de lodo alicado no solo e produtividade do Capim-Tifton 85*. 2017. 90 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.
- PRITCHARD, D.L.; PENNEY, M.J.; MCLAUGHLIN, H.; RIGBY, H.; SCHWARZ, K. Land application of sewage sludge (biosolids) in Australia: risks to the environment and food crops. *Water Science and Technology*, v. 62, n. 1, p. 48 – 57, 2010. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.274>
- PU, G.; BELL, M.; BARRY, G.; WANT, P. Estimating mineralization of organic nitrogen from biosolids and other organic wastes applied to soils in subtropical Australia. *Soil Research*, v. 50, n. 2, p. 91 – 104, 2012. <http://dx.doi.org/10.1071/sr11272>
- RIGBY, H.; VIANA, F.; CASS, J.; ROGERS, M.; SMITH, R. The influence of soil and biosolids type, and microbial immobilization on nitrogen availability in biosolids-amended agricultural soils - implications for fertilizer recommendations. *Soil Use and Management*, v. 25, n. 4, p. 395 – 408, 2009. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150216>
- RIGBY, H.; PRITCHARD, D.; COLLINS, D.; WLTON, K.; ALLEN, S.; PENNEY, N. Improving guidelines for the plant available nitrogen value of biosolids from wastewater treatment. *Journal of Residuals Science & Technology*, v. 7, n. 1, p. 13 – 19, 2010. <http://hdl.handle.net/20.500.11937/3989>
- RIGBY, H.; CLARKE, B.; PRITCHARD, D.; MEEHAN, B.; BESHAN, F.; SMITH, S.; PORTER, N. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Science of the Total Environment*, v. 541, p. 1310 – 1338, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.089>
- ROSSI, G.; BENI, C. Effects of medium-term amendment with diversely processed sewage sludge on soil humification-mineralization processes and on Cu, Pb, Ni, and Zn bioavailability. *Plants*, v. 7, n. 1, p. 1 – 10, 2018. <https://doi.org/10.3390/plants7010016>
- SAMPAIO, A. Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. *Revista DAE*, São Paulo, n. 193, p. 16 – 27, 2013. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.109>

SANDOVAL-ESTRADA, M.; HIDALGO, J.; STOLPE, N.; CAPULLÍN, J. Efecto de enmiendas con lodos urbanos y de salmonicultura en la estructura de un entisol y un alfisol en Chile. *Agrociencia*, v. 44, n. 5, p. 503 – 515, 2010. Disponível em: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952010000500001>. Acesso em: 17 mar. 2022.

SHARMA, B.; SARKAR, S.; SINGH, P.; PRATAP, R. Agricultural utilization of biosolids: a review on potential effects on soil and plant grown. *Waste Management*, v. 64, p. 117 – 132, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.002>

SILVA, D.; MATOS, A.T.; MATOS, M. Mineralization of organic matter and productivity of Tifton 85 grass (*Cynodon spp.*) in soil incorporated with stabilized sludge from a vertical flow constructed wetland. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, v. 09, p. 309 – 318, 2019. <https://doi.org/10.2166/washdev.2019.133>

SRIVASTAVA, V.; FERREIRA, A.; VAISH, B.; BARTELT-HUNT, S.; SINGH, P.; SINGH, R. Biological response of using municipal solid waste compost in

agriculture as fertilizer supplement. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, v. 15, n. 4, p. 677 – 696, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11157-016-9407-9>

VIEIRA, R.F.; MAIA, A.H.N.; TEIXEIRA, M.A. Inorganic nitrogen in a tropical soil with frequent amendments of sewage sludge. *Biology and Fertility of Soils*, v. 41, n. 4, p. 273 – 279, 2005. <http://dx.doi.org/10.1007/s00374-004-0803-x>

WANG, H.; KIMBERLEY, M.O.; SCHLEGELMILCH, M. Biosolids-Derived nitrogen mineralization and transformation in forest soils. *Journal of Environment Quality*, v. 32, n. 5, p. 1851, 2003. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2003.1851>

ZHANG, X.; ZHAO, Y.; ZHU, L.; CUI, H.; JIA, L.; XIE, X.; LI, J.; WEI, Z. Assessing the use of composts from multiple sources based on the characteristics of carbon mineralization in soil. *Waste Management*, v. 70, p. 30 – 36, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.08.050>