



Efeito do lodo de esgoto caleado e não caleado no pH de solos de diferentes texturas

Effect of limed and unlimed sewage sludge on the pH of soils of different textures

K. A. Viçosi*; G. O. Garcia

Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre-ES, 29500-000, Brasil

* *karen.vicosi@edu.ufes.br*

(Recebido em 29 de novembro de 2023; aceito em 09 de abril de 2024)

O lodo de esgoto é um resíduo que pode ser utilizado na agricultura devido à presença de matéria orgânica e nutrientes. Entretanto, deve ser estabilizado e higienizado, sendo a aplicação de cal virgem uma possibilidade de tratamento através da elevação do pH. Assim, o objetivo do trabalho é avaliar o pH em solos de diferentes texturas submetidos a doses de lodo de esgoto caleado e não caleado. O experimento foi composto por um fatorial triplo $2 \times 3 \times 6$, no qual foi utilizado dois tratamentos (não caleado e caleado), três texturas de solo (arenosa, média e argilosa) e seis doses de lodo de esgoto (0, 5, 10, 20, 40 e 80 t ha^{-1}), com três repetições. A dose necessária a dose de cal virgem para elevar o pH em 12 foi de 44 kg m^{-3} e 72 kg m^{-3} , no período de 2 e 72 horas, respectivamente. O lodo de esgoto não caleado causou redução acentuada do pH do solo aos 21 dias, resultado do processo de decomposição e nitrificação, e a aplicação com de 80 t ha^{-1} reduz o pH em 4,8%, 9,9% e 9,6%, para a textura arenosa, média e argilosa. O lodo caleado apresentou alta reatividade no solo aos sete dias, com redução da reação de alcanilização ao longo do tempo. No geral, para solo arenoso, o valor de pH ficou em torno de 7,6, sendo que para os solos médio e argiloso o valor de pH ficou em 7,4, na dose 80 t ha^{-1} .

Palavras-chave: biossólido, caleação, argila.

Sewage sludge is a residue that can be used in agriculture due to the presence of organic matter and nutrients. However, it must be stabilized and sanitized, with the application of quicklime being a possible treatment by raising the pH. Thus, the objective of the work is to evaluate the pH in soils of different textures subjected to doses of limed and unlimed sewage sludge. The experiment was composed of a triple factorial $2 \times 3 \times 6$, in which two treatments were used (not limed and limed), three soil textures (sandy, medium and clayey) and six doses of sewage sludge (0, 5, 10, 20, 40 and 80 t ha^{-1}), with three replications. The dose of quicklime required to raise the pH by 12 was 44 kg m^{-3} and 72 kg m^{-3} , in a period of 2 and 72 hours, respectively. Unlimed sewage sludge caused a marked reduction in soil pH after 21 days, as a result of the decomposition and nitrification process, and application of 80 t ha^{-1} reduces pH by 4.8%, 9.9% and 9.6%, for sandy, medium and clayey texture. The limed sludge showed high reactivity in the soil after seven days, with a reduction in the alkanylization reaction over time. In general, for sandy soil, the pH value was around 7.6, while for medium and clayey soils the pH value was 7.4, at a dose of 80 t ha^{-1} .

Keywords: biosolids, limestone, clay.

1. INTRODUÇÃO

O lodo de esgoto é um material residual produzido em estações de tratamento de esgoto e contém quantidades consideráveis de matéria orgânica e nutrientes, sendo utilizado em muitos países como fertilizante para aumentar a produção agrícola [1]. Seu uso na agricultura brasileira parece uma estratégia de destinação viável, uma vez que a maioria dos solos tem baixa fertilidade [2]. Entretanto, para ser utilizado na agricultura, o lodo de esgoto deve ser tratado visando a redução de sólidos e odores biodegradáveis, a estabilização da matéria orgânica e a eliminação de vetores, sendo então depois denominado biossólido [3].

Alguns dos processos realizados para higienização e estabilização do lodo de esgoto estão a caleação, compostagem e solarização. A cal virgem é um dos produtos químicos mais utilizados em razão do baixo custo, simplicidade do processo e eficiência na eliminação de patógeno [4]. Nesse processo, o pH do lodo de esgoto é elevado até 12, no qual ocorre a alteração da temperatura e a ação da amônia, resultante de transformação do nitrogênio em meio fortemente alcalino [5].

Ao final, o bio sólido torna-se altamente alcalino e atua como corretivo e fornecedor de matéria orgânica a ser aplicado em solos ácidos [6].

Entretanto, a dinâmica do bio sólido no solo depende de diversos fatores, dentre eles a textura e seu poder tampão. Em geral, solos com menor teor de argila tem menor poder tampante e sofrem com maior variação de pH [7]. Em solos leves, com textura arenosa, as características físico-químicas são potencialmente melhoradas pela adição de bio sólido, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola [8]. O poder tampão de cada solo controla as variações de pH e interferem nas reações de precipitação/dissolução, adsorção/dessorção, complexação e oxirredução de nutrientes no solo [9]. Desse modo, o objetivo do trabalho é avaliar as mudanças de pH em solos de diferentes texturas quando submetidos a doses crescentes de lodo de esgoto caledo e não caledo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi composto por um fatorial triplo 2 x 3 x 6, no qual foi utilizado dois tratamentos (lodo de esgoto não caledo e caledo), três texturas de solo (arenosa, média e argilosa) e seis doses de lodo de esgoto (0, 5, 10, 20, 40 e 80 t ha⁻¹), com três repetições cada.

O lodo de esgoto foi coletado no leito de secagem da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), localizado em Jerônimo Monteiro-ES (20°47'19.3"S e 41°23'50.4"W). As análises foram realizadas no Laboratório de Resíduos Sólidos, localizado na área experimental do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, localizado em Alegre-ES (20°45'06.9"S e 41°29'14.7"W). As características do lodo de esgoto estão descritas na Tabela 1, analisados de acordo com metodologia do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2017) [10].

Tabela 1. Características físico-químicas do lodo de esgoto proveniente da ETE de Jerônimo Monteiro-ES.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Umidade (%)	35,42	Potássio ³ (%)	0,75
pH (CaCl ₂)	6,00	Cálcio ³ (%)	1,33
CTC (mmol kg ⁻¹)	479,00	Magnésio ³ (%)	0,33
Matéria orgânica (%)	68,38	Enxofre ³ (%)	0,93
Carbono orgânico ¹ (%)	35,79	Ferro ³ (%)	1,45
Nitrogênio ² (%)	3,39	Zinco ³ (mg kg ⁻¹)	491,7
Relação C/N	11/1	Cobre ³ (mg kg ⁻¹)	147,5
Fósforo ³ (%)	1,48	Manganês ³ (mg kg ⁻¹)	28,4

¹Oxidação com Bicromato de potássio; ²Digestão sulfúrica; ³Digestão nitro-perclórica.

2.1 Incubação do lodo de esgoto com cal

Para a incubação do lodo de esgoto com cal hidratada com fins de higienização, foi utilizado o método descrito por Matos (2015) [11]. Foi colocado 200 cm³ de lodo seco em sacos plásticos, adicionando as seguintes doses de cal virgem hidratada (Ca(OH)₂): 0, 12,5, 25, 50, 100 e 200 kg m⁻³, com quatro repetições cada. A mistura recebeu água até ser atingida a capacidade de campo, para favorecimento da reação e, após 2 h e 72 h de efetuada a mistura, o pH do material foi medido em suspensão preparada com solução CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹, proporção 1:2,5. A leitura realizada em pHmetro de bancada. Uma curva do pH em função da dose de cal foi obtida, para cada tempo após efetuada, para valor de pH igual a 12.

2.2 Incubação do solo com lodo de esgoto

Os diferentes solos foram coletados na área experimental da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo), campus Alegre, e peneirados em peneira de 2 mm, sendo coletado uma amostra

para obtenção da textura. A análise textural foi realizada pela metodologia de Teixeira et al. (2017) [12], no qual o solo sofreu agitação lenta (50 rpm) por 16 horas em agitador tipo Wagner, utilizando o dispersante NaOH 0,1 mol L⁻¹, com determinação das frações silte e argila pelo método da pipeta. O resultado da análise textural está descrito na Tabela 2.

Tabela 2: Análise textural dos solos utilizados no experimento.

	Areia grossa	Areia fina %	Silte	Argila	Textura
Solo 1	78	16	2	4	Arenosa
Solo 2	30	13	24	55	Argilosa
Solo 3	21	18	6	33	Média

Foi realizada a incubação do solo, adicionando 200 cm³ do solo em sacos plásticos com sua respectiva dose de lodo de esgoto (0, 5, 10, 20, 40 e 80 t ha⁻¹), sendo três repetições cada dose. Para os tratamentos com lodo de esgoto caído, foi adicionado a dose que manteve o pH em 12 durante 72 horas. As amostras foram mantidas com umidade próxima a capacidade de campo e temperatura em torno de 23 °C. Foi coletado 10 cm³ de solo nos períodos de 7, 14, 21, 30, 40, 60 e 90 dias para obtenção do pH. O pH foi obtido pela mistura 1:2,5 com CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ e a leitura realizada em pHmetro de bancada.

2.3 Análise dos dados

De posse dos dados, foi feita análise de variância e análise de regressão linear múltipla da dose do lodo de esgoto em função da porcentagem de argila do solo, nos diferentes dias de coleta, por meio do software R.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Incubação do lodo de esgoto com cal

De acordo com o mostrado na Figura 1, a dose de cal virgem hidratada para elevar o pH em 12 foi de 44 kg m⁻³ e 72 kg m⁻³, para o período de 2 e 72 horas, respectivamente. De acordo com Matos e Matos (2012) [13], esses resultados confirmam o fato que a dose de cal tende a aumentar com o tempo de reação, tendo em vista que deverá neutralizar a acidez gerada no processo de degradação biológica e decomposição do biossólido. Valores semelhantes foram encontrados por Fia et al. (2005) [14], no qual foi necessária a dose de 75 kg m⁻³ de cal, após três dias de incubação, enquanto Matos e Matos (2012) obtiveram doses de 29,1 kg m⁻³ e 71,2 kg m⁻³, para duas e 72 horas, respectivamente.

Essa elevação do pH do biossólido através da adição de cal virgem confere ao resíduo a possibilidade de ser utilizado na agricultura como corretivo agrícola. Uma vez no solo, o CaO é solubilizado e dissociado em Ca²⁺ + 2OH⁻, que ao se ligar com o H⁺ da solução do solo, forma água e reduz a acidez ativa [15]. Além disso, ocorre oxidação do N-orgânico e formação de íons amônio, que também são capazes de neutralizar a acidez do solo [16] conferindo ao resíduo poder de neutralização superior ao do calcário [17]. Desse modo, o biossólido caído pode atuar como corretivo da acidez, o que é favorável para agricultura brasileira, visto que os solos são geralmente ácidos, necessitando dessa condição alterada para a obtenção de maiores produtividades agrícola [14].

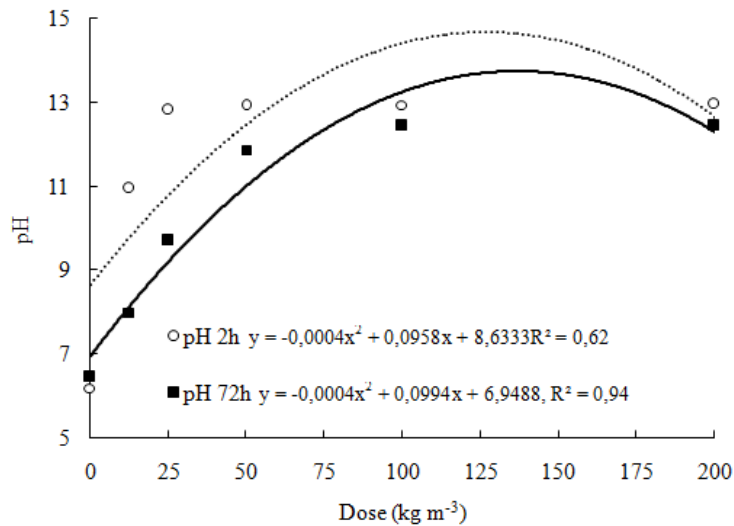


Figura 1. Curva de incubação do lodo de esgoto em diferentes doses de cal virgem hidratada, após 2 e 72 horas.

3.2 Incubação do solo com lodo de esgoto não caleado

A Figura 2 mostra a incubação de solos com diferentes teores de argila com doses crescentes de lodo de esgoto não caleado. Aos sete dias e quatorze dias (Figuras 2A-B), é possível observar pequeno aumento do pH com a aplicação de lodo de esgoto, entretanto, nesse período, a dose não influenciou significativamente no pH. Esse aumento inicial do pH pode ter resultado do efeito da amonificação, processo pelo qual há o consumo H^+ e produção de OH^- [18] e foi mais intenso no solo de textura arenosa.

Entretanto, a partir de 21 dias da incubação, foi possível observar efeito significativo da dose de lodo de esgoto aplicada. Para os três tipos de textura de solo, houve redução drástica do pH com o aumento da dose de lodo de esgoto no dia 21. O pH para os solos, na dose de $80 t ha^{-1}$ de lodo de esgoto, foi de 5,83 para solo arenoso, 4,16 para textura média e 3,97 para textura argiloso, o que representa uma redução, em relação ao solo sem aplicação do resíduo, de 9,1%, 37,6% e 35,9%, respectivamente (Figura 2C). Rosas-Patiño et al. (2017) [19] afirmam que o pH desejado para a agricultura deve ser igual ou superior a 5,5.

Essa redução do pH em solos que receberam a aplicação do lodo de esgoto foi relatada por Pereira et al. (2015) [20], nas profundidades de 0-10 e 10-20 cm. Huang e Chen (2009) [18] observaram uma tendência de alcalinização no solo a partir de 21 dias, ao estudar diferentes solos. Essa acidificação do solo é resultado da matéria orgânica em decomposição, que produz H^+ e CO_2 dissolvido, formando ácidos orgânicos fracos, como o ácido carbônico, resultando em uma diminuição gradual do pH [21]. Além disso, pode ter ocorrido reações de nitrificação do nitrogênio amoniacal, um dos fenômenos responsáveis pelo decréscimo do pH, devido a baixa relação C:N do bio-sólido [22].

Aos 30, 40, 60 e 90 dias (Figura 2D-G), houve redução do pH com a aplicação de doses maiores de lodo de esgoto (acima de $40 t ha^{-1}$), enquanto que doses menores de bio-sólido mantiveram o pH próximo ao solo sem aplicação. Nesse período de tempo, a teor de argila não foi significativo. No geral (Figura 2H), a aplicação $80 t ha^{-1}$ reduziu pH em 4,8%, 9,9% e 9,6%, para a textura arenosa, média e argilosa, respectivamente, o que manteve o pH em 6,11, 5,98 e 5,98. A variável tempo foi significativa, assim como o teor de argila e a dose de lodo de esgoto, todas influenciando negativamente no pH. De acordo Skowrońska et al. (2020) [23], o tempo de aplicação do resíduo teve efeito menos acentuado no pH do solo quando comparado as doses aplicadas, que exerceram maior influência.

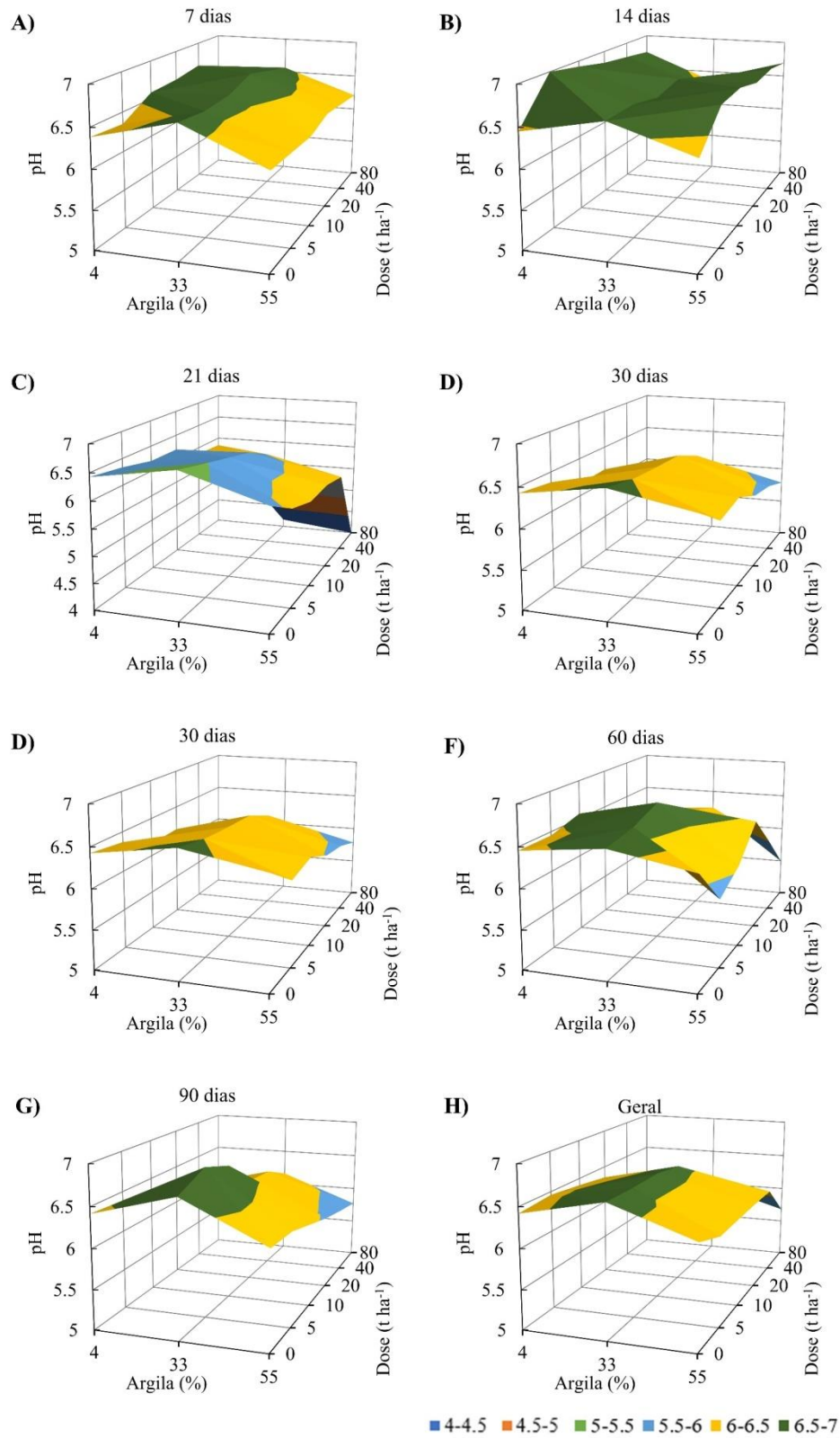


Figura 2. Médias de pH de solos com diferentes teores de argila incubados com doses crescentes de lodo de esgoto não calcado, ao longo do tempo. 7 dias: $pH = 6.604 - 0.0002D - 0.005A^*$; 14 dias: $pH = 6.79 - 0.0009D - 0.003A^*$; 21 dias: $pH = 6.708 - 0.021D^* - 0.012A^*$; 30 dias: $pH = 6.389 - 0.007D^* - 0.008A$; 40 dias: $pH = 6.532 - 0.0038D - 0.0002A$; 60 dias: $pH = 6.532 - 0.004D^* - 0.003A$; 90 dias: $pH = 6.393 -$

$0.005D^* - 0.004A$; geral: $pH = 6.633 - 0.006D^* - 0.004A^* - 0.0015T^*$. *Significativo a 5% de probabilidade.

Pereira et al. (2015) [20] observaram decréscimo nos valores de pH do solo nos tratamentos que receberam lodo de esgoto em relação à testemunha, o que pode ser benéfico para solos com pH alcalino ou próximo a neutralidade. Entretanto, Pereira et al. (2020) [6] observaram que para solos com pH médio (5,5-6,0) doses altas de lodo de esgoto reduziram o pH a níveis baixos (< 4,5), o que resultou em aumento linear da disponibilidade do Al^{3+} no solo. Em solos ácidos, podem ocorrer altos níveis de alumínio ou manganês associados à deficiência de cálcio e toxidez de ferro que limitam o crescimento vegetal [24]. Além disso, quando os valores de pH estão abaixo de 6, ocorre o aumento da mobilidade e disponibilidade de metais pesados no solo [25] e micronutrientes como Cu, Zn e Mn tendem a estarem mais disponíveis e com concentrações elevadas, a ponto de causar fitotoxidez às plantas [6].

Em relação à textura, solos com altos teores de argila tem maior poder tamponante, o que resulta em menor variação do pH do solo [26] e maiores doses de lodo de esgoto para ocorrer variação significativa do pH, ao comparar com solos com menor teor de argila. Para solo arenoso, foi maior a redução do pH a partir da dose de 40 t ha^{-1} , enquanto para solos de textura média e argilosa a maior redução ocorreu na dose de 80 t ha^{-1} . No entanto, a redução do pH é variável e depende do tipo de solo, dosagem e características do lodo, tempo de incubação, dentre outros fatores [27].

3.3 Incubação do solo com lodo de esgoto caledado

A Figura 3 mostra o resultado da incubação dos diferentes solos com lodo de esgoto caledado ao longo do tempo. É possível observar que, aos sete dias (Figura 3A) houve grande incremento do pH para o solo com 4% de argila, que na dose de 5 t ha^{-1} elevou o pH de 6,39 para 7,35. Para solos com 33% e 55% de argila, o aumento do pH foi linear em função da dose aplicada. Na dose de 80 t ha^{-1} , houve um incremento de 123%, 115% e 129% do pH para solos de textura arenosa, média e argilosa, respectivamente. O solo com maior teor de argila apresentou pH final de 8.

De acordo com Serrat et al. (2011) [28], a maior parte dos hidróxidos reagem no início da incubação. A adição de CaO no processo de estabilização do lodo de esgoto resulta em material com elevado poder de correção da acidez, podendo inclusive alcançar valores de pH acima do recomendado para agricultura [29]. Uma vez no solo, o CaO é solubilizado e dissociado em $Ca^{2+} + 2OH^-$, que se liga ao H^+ da solução do solo formando água e reduzindo a acidez ativa [15]. Entretanto, essa alcalinização inicial reduz a disponibilidade de nutrientes, o crescimento e a adsorção de nutrientes das plantas, ocasionado a formação de compostos quelatos indisponíveis para as plantas [30], o que pode ser prejudicial temporariamente para as culturas.

Após 14 de incubação (Figura 3B), os valores de pH se mantiveram em elevação, em especial no solo arenoso, no qual as doses de 40 e 80 apresentaram pH acima de 7,5. Aos 21 dias (Figura 3C), a tendência de elevação do pH se manteve, porém não houve influência significativa do teor de argila. Aos 30 dias (Figura 3D), o solo de textura média obteve incremento maior de pH na dose de 80 t ha^{-1} , com pH final de 7,65. Aos 40 e 60 dias (Figura 3E-F), o solo arenoso foi o mais influenciado pela aplicação do bio sólido caledado. Aos 90 dias (Figura 3G), os solos de diferentes texturas apresentaram comportamento semelhante, com o pH máximo variando entre 7,0-7,5. Essa redução do pH, comparado com o tempo de sete dias, já era esperado, visto que a reatividade da cal diminui com elevação do pH e o aumento de Ca no sistema [28].

No geral, ambos os solos apresentaram aumento semelhante do pH no final do experimento, de 114%, 107% e 116%, respectivamente, para solo arenoso, médio e argiloso, na dose de 80 t ha^{-1} . Nesta dose, para solo arenoso, o valor de pH ficou em torno de 7,6, sendo que para os demais solos o valor de pH ficou em 7,4. Entretanto, a variável tempo não apresentou significância (Figura 3H).

O aumento do pH do solo com a aplicação do bio sólido caledado já era esperado. Marin et al. (2010) [31] observaram aumento do pH com o aumento da dose do lodo de esgoto caledado para três classes de solo, corroborando com os resultados apresentados por Serrat et al. (2011) [28],

estudando dois lodos de esgoto provenientes de ETE diferentes, observaram que tendência de acréscimos do pH do solo com a elevação da dose aplicada.

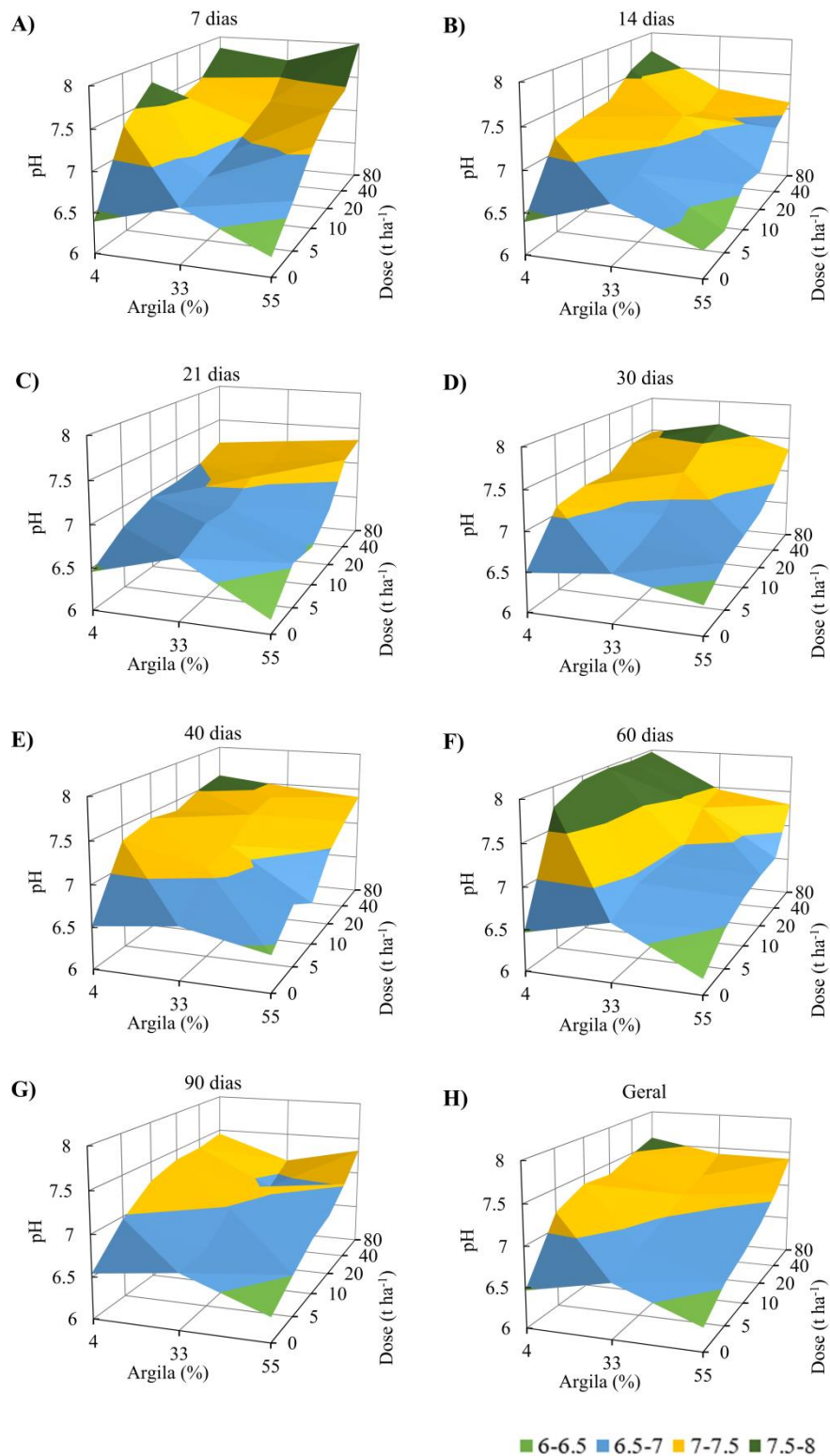


Figura 3. Médias de pH de solos com diferentes teores de argila incubados com doses crescentes de lodo de esgoto calcado, ao longo do tempo. 7 dias: $pH = 6.973 + 0.137D^* - 0.005A^*$; 14 dias: $pH = 7.092 + 0.009D^* - 0.012A^*$; 21 dias: $pH = 6.707 + 0.009D^* - 0.002A$; 30 dias: $pH = 6.928 + 0.011D^* - 0.006A^*$; 40 dias: $pH = 7.125 + 0.009D^* - 0.008A^*$; 60 dias: $pH = 7.485 + 0.010D^* - 0.020A^*$; 90 dias:

$pH = 6.997 + 0.008D^* - 0.008A^*$; geral: $pH = 7.055 + 0.01D^* - 0.009A^* - 0.0004T$. *Significativo a 5% de probabilidade.

Entretanto, o aumento para pH acima de 7 altera a disponibilidade de nutrientes para as plantas. Em pH alcalino, ocorre a redução da disponibilidade de N, P, K, Ca, Mg, Zn, B e Cu [32]. Rosas-Patiño et al. (2017) [19] observar uma redução da concentração de Al, Fe, Mn, K, Cu e B no solo com a calagem. Em nosso experimento, o solo de textura arenosa, com menor capacidade tampão, necessitou de $1,9 \text{ t ha}^{-1}$ de lodo de esgoto caleado para atingir o pH 7, enquanto os solos de textura média e argilosa necessitaram de 24,2 e 44 t ha^{-1} , respectivamente.

Segundo Hamdi et al. (2019) [21], a variação do pH em solos corrigidos depende de vários fatores, incluindo a qualidade do lodo, a dose aplicada, bem como as características do solo e as condições de mineralização. Isso vai de encontro com o descrito por Samara et al. (2017) [7], no qual afirmam que aumento do pH do solo após a adição do biossólido dependem do pH inicial do solo, da capacidade de tamponamento dos solos e da presença de CaCO_3 .

O poder tampão de cada solo controla as variações de pH e, conseqüentemente, interferem nas reações e disponibilidade de nutrientes na solução do solo [9]. Os mesmos autores observaram que a menor dose de lodo de esgoto caleado foi necessária para elevar o pH do solo para 6,7 em Neossolo quartzarênico (93% de areia), enquanto foi necessária uma dose quase dez vezes maior para atingir o mesmo valor em um Latossolo Vermelho distroférico, com mais de 50% de argila. Samara et al. (2017) [7] observaram aumento maior do pH em solo ácido com baixo teor de argila, que possui baixa capacidade tamponante, ao comparar com solos com maior teor de argila. Além disso, em solos de clima tropical, a capacidade de troca catiônica é fortemente dependente do pH, uma vez que a matéria orgânica, os óxidos de ferro/alumínio e o colóides de argila 1:1 são caracterizados por cargas negativas afetadas pelo pH do solo [33]. Desse modo, deve-se considerar o teor de argila do solo para definir a dose de lodo de esgoto caleado a ser aplicada.

4. CONCLUSÃO

Para o lodo de esgoto da ETE de Jerônimo Monteiro, a dose necessária de cal virgem hidratada para elevar o pH em 12 foi de 44 kg m^{-3} e 72 kg m^{-3} , para o período de 2 e 72 horas, respectivamente.

O lodo de esgoto não caleado reduz o pH do solo aos 21 dias. Entretanto, no geral, a aplicação de 80 t ha^{-1} reduz o pH em 4,8%, 9,9% e 9,6%, para a textura arenosa, média e argilosa, respectivamente.

O lodo de esgoto caleado apresenta alta reatividade no solo aos sete dias, com redução da reação de alcalinização ao longo do tempo. No geral, para solo arenoso, o valor de pH ficou em torno de 7,6, sendo que para os solos médio e argiloso o valor de pH ficou em 7,4, na dose 80 t ha^{-1} . Solos de textura arenosa, com menor capacidade tampão, necessitam de menores doses de lodo de esgoto caleado para atingir o pH 7.

5. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (Fapes) pela concessão de bolsa de doutorado por meio do edital nº 13/2019 - PROCAP 2020.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Głab T, Żabiński A, Sadowska U, Gondek K, Kopeć M, Mierzwa-Hersztek M, et al. Fertilization effects of compost produced from maize, sewage sludge and biochar on soil water retention and chemical properties. *Soil Tillage Res.* 2020;197:104493. doi: 10.1016/j.still.2019.104493
2. Nascimento AL, De Souza AJ, Oliveira FC, Coscione AR, Viana DG, Regitano JB. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. *J Clean Prod.* 2020;258:120746. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120746

3. Campos T, Chaer G, Leles PS, Silva M, Santos F. Leaching of heavy metals in soils conditioned with biosolids from sewage sludge. *Floresta Ambient.* 2019;26(1):e20180399. doi: 10.1590/2179-8087.039918
4. Nascimento AL, Sampaio RA, Cruz SF, Zuba Junio GR, Barbosa CF, Fernandes LA. Metais pesados em girassol adubado com lodo de esgoto submetido a diferentes processos de estabilização. *Rev Bras Eng Agríc Ambient.* 2014;18(7):694-9. doi: 10.1590/S1415-43662014000700004
5. Rossmann M, Vieira DB, Avelar FF, Matos AT. Redução da viabilidade de ovos de helmintos em lodo de esgoto doméstico caleado. *Eng Agricultura.* 2014;22(1):43-9.
6. Pereira IS, Bamberg AL, De Sousa RO, Monteiro AB, Martinazzo R, Silveira CAP, et al. Agricultural use and pH correction of anaerobic sewage sludge with acid pH. *J Environ Manag.* 2020;275:111203. doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111203
7. Samara E, Matsi T, Balidakis A. Soil application of sewage sludge stabilized with steelmaking slag and its effect on soil properties and wheat growth. *Waste Manag.* 2017;68:378-87. doi: 10.1016/j.wasman.2017.06.016
8. Douaer N, Douaoui A, Mehaiguen M, Zouidi M, Hamza W. The effect of municipal sewage sludge on properties physicochemical and microbial agricultural soil. *Not Sci Biol.* 2021;13(1):10804-10804. doi: 10.15835/nsb13110804
9. Carmo DL, Silva CA. Condutividade elétrica e crescimento do milho em solos contrastantes sob aplicação de diversos níveis de calagem. *Pesqui Agropecu Bras.* 2016;51(10):1762-72. doi: 10.1590/S0100-204X2016001000008
10. Brasil. Manual de métodos analíticos oficiais para fertilizantes e corretivos. Brasília (DF): MAPA; 2017.
11. Matos AT. Manual de análise de resíduos sólidos e águas residuárias. Viçosa (MG): Editora UFV; 2015.
12. Teixeira PC, Donagemma GK, Fontan A, Teixeira WG. Manual de métodos de análise de solo. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos; 2017.
13. Matos MP, Matos AT. Dose de cal hidratada e características químicas de um lodo de esgoto doméstico submetido à caleação. *Eng Agri.* 2012;20(4):357-63. doi: 10.13083/reveng.v20i4.337
14. Fia R, Matos AD, Aguirre CI. Características químicas de solo adubado com doses crescentes de lodo de esgoto caleado. *Eng Agri.* 2005;13(4):287-99.
15. Freiberger MB, Castoldi G, Capuani S, Ribeiro DO, Silva FG, Büll, LT. Aplicações de lodos de esgoto em um Oxisol: Efeitos na acidez e disponibilidade de micronutrientes. *Rev Bras Eng Agríc Ambient.* 2020;24(6):402-8. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v24n6p402-408
16. Corrêa JC, Freitag EE, Büll LT, Crusciol CAC, Fernandes DM, Marcelino R. Aplicação superficial de calcário e diferentes resíduos em soja cultivada no sistema plantio direto Bragantia. 2009;68(4):1059-68. doi: 10.1590/S0006-87052009000400027
17. Corrêa JC, Büll LT, Crusciol CAC, Marcelino R, Mauad M. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário *Pesqui. Agropecu. Bras.* 2007;42(9):1307-17. doi: 10.1590/S0100-204X2007000900013
18. Huang CC, Chen ZS. Carbon and nitrogen mineralization of sewage sludge compost in soils with a different initial pH. *Soil Sci Plant Nutr.* 2009;55(5):715-24. doi: 10.1111/j.1747-0765.2009.00410.x
19. Rosas-Patiño G, Puentes-Páramo YJ, Menjivar-Flores JC. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Cienc Tecnol Agropecu.* 2017;18(3):529-41. doi: 10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
20. Pereira NGF, Frazão LA, Oliveira ALG, Cardoso PHS, Sampaio RA, Fernandes LA. Efeitos da aplicação de lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos nos atributos químicos e microbiológicos de um cambissolo háplico *Cad Ciênc Tecnol.* 2015;32(1/2):115-27. doi: 10.35977/0104-1096.cct2015.v32.23307
21. Hamdi H, Hechmi S, Khelil MN, Zoghلامي IR, Benzarti S, Mokni-Tlili S, et al. Repetitive land application of urban sewage sludge: Effect of amendment rates and soil texture on fertility and degradation parameters. *Catena.* 2009;172:11-20. doi: 10.1016/j.catena.2018.08.015
22. Pigozzo ATJ, Lenzi E, Luca Júnior J, Scapim CA, Vidigal Filho PS, Costa ACS. Reação do solo e disponibilidade de micronutrientes, em solo de textura média, tratado com lodo de esgoto e cultivado com milho *Acta Sci, Agron.* 2008;30(4):569-79. doi: 10.4025/actasciagron.v30i4.5320
23. Skowrońska M, Bielińska EJ, Szymański K, Futa B, Antonkiewicz J, Kołodziej B. An integrated assessment of the long-term impact of municipal sewage sludge on the chemical and biological properties of soil. *Catena.* 2020;189:104484. doi: 10.1016/j.catena.2020.104484
24. Pavinato OS, Rosolem CA. Disponibilidade de nutrientes no solo: Decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. *Rev Bras Ciênc Solo.* 2008;32(3):911-20. doi: 10.1590/S0100-06832008000300001

25. Nunes N, Ragonezi C, Gouveia CS, Carvalho MÂP. Review of sewage sludge as a soil amendment in relation to current international guidelines: A heavy metal perspective. *Sustainability*, Basel. 2021;13(4):2317. doi: 10.3390/su13042317
26. Poggere GC, Serrat BM, Motta ACV, Bittencourt S, Dalpisol M, Andreoli CV. Lodos de esgoto alcalinizados em solos do estado do Paraná: taxa de aplicação máxima anual e comparação entre métodos para recomendação agrícola. *Eng Sanit Ambient*. 2012;17(4):429-38. doi: 10.1590/S1413-41522012000400010
27. Dhanker R, Chaudhary S, Goyal S, Garg VK. Influence of urban sewage sludge amendment on agricultural soil parameters. *Environm Technol Innovation*. 2021;23:101642. doi: 10.1016/j.eti.2021.101642
28. Serrat BM, Santiago TR, Bittencourt S, Motta ACV, Da Silva LATP, Andreoli CV. Taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado pelo processo de estabilização alcalina: estudo comparativo de curvas de pH de solos. *Rev Bras Ciênc Ambient*. 2011;19:30-7.
29. Nascimento AL, Sampaio RA, Junio GRZ, Fernandes LA, Cruz SF, Carneiro JP, et al. Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. *Biosci J*. 2014;30(1):146-53.
30. Melo RM, Vieira MC, Carnevali TO, Gonçalves WV, Torales EP, Tolouei SEL, et al. Calagem e textura do substrato afetam o desenvolvimento de *Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg. *Rev Cienc Agrár*. 2019;42(1):99-108. doi: 10.19084/RCA18283
31. Marin LMK, Bittencourt S, Andreoli CV, Carafini C, Lima MRD, Serrat BM, et al. Determinação da taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado por processo alcalino em solos da região metropolitana de Curitiba. *Eng Sanit Ambient*. 2010;15(2):113-8. doi: 10.1590/S1413-41522010000200003
32. Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. São Paulo: Agronômica Ceres; 2006.
33. Florentino AL, Ferraz ADV, Gonçalves JLDM, Asensio V, Muraoka T, Santos Dias CTD, et al. Long-term effects of residual sewage sludge application in tropical soils under Eucalyptus plantations. *J Clean Prod*. 2019;220:177-87. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.065