

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS**  
**AMBIENTAIS E FLORESTAIS**

**DISSERTAÇÃO**

**Lixiviação de metais pesados e macronutrientes em  
solos condicionados com biossólido de lodo de esgoto**

**THAÍS DE OLIVEIRA CAMPOS**

**Maior – 2017**  
**Seropédica - RJ**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE FLORESTAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E  
FLORESTAIS**

**LIXIVIAÇÃO DE METAIS PESADOS E MACRONUTRIENTES EM  
SOLOS CONDICIONADOS COM BIODOSSÍLIDO DE LODO DE  
ESGOTO**

**THAÍS DE OLIVEIRA CAMPOS**

*Sob a Orientação do Pesquisador Doutor*  
**Guilherme Montandon Chaer**

*e Co-orientação do Professor Doutor*  
**Paulo Sérgio dos Santos Leles**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Ambientais e Florestais**, ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração Silvicultura e Manejo Florestal.

Seropédica – RJ  
Maio – 2017

**Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**  
**Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico**

d1981 de Oliveira Campos, Thaís, 1990-  
Lixiviação de metais pesados e macronutrientes em  
solos condicionados com biossólido de lodo de esgoto /  
Thaís de Oliveira Campos. - 2017.  
78 f.: il.

Orientador: Guilherme Montandon Chaer.  
Coorientador: Paulo Sérgio dos Santos Leles.  
Dissertação(Mestrado). -- Universidade Federal  
Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em  
Ciências Ambientais e Florestais, 2017.

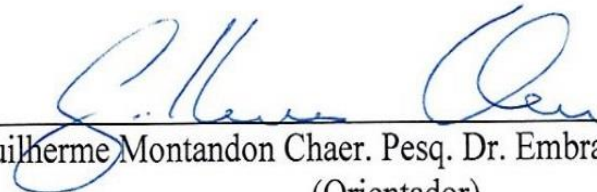
1. Lodo de esgoto. 2. Biossólido. 3. Metais  
pesados. 4. Ensaio com colunas. 5. Lixiviação. I.  
Montandon Chaer, Guilherme, 1975-, orient. II. Sérgio  
dos Santos Leles, Paulo, 1966-, coorient. III  
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso  
de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais.  
IV. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**  
**E FLORESTAIS**


**THAÍS DE OLIVEIRA CAMPOS**

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração em Silvicultura e Manejo Florestal.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 31 / 05 / 2017

  
\_\_\_\_\_  
Guilherme Montandon Chaer. Pesq. Dr. Embrapa Agrobiologia  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Erica Souto Abreu Lima. Bolsista de Pós-doutorado. DS/IA/UFRRJ  
(Membro)

  
\_\_\_\_\_  
Alexander Silva de Resende. Pesq. Dr. Embrapa Agrobiologia  
(Membro)

## DEDICATÓRIA

*Dedico à minha família,  
meu refúgio e fortaleza.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por sua bondade e misericórdia para com a minha vida. Pela força para encarar os obstáculos, e acima de tudo, pelas incontáveis pessoas maravilhosas que fez cruzar meu caminho desde o início da minha caminhada na UFRRJ em 2009.

Aos meus pais Solange e Lucinei, pelo incentivo e incansável esforço em me oferecer condições para estudar. Cada vitória que conquisto é uma vitória de vocês.

À minha irmã Milena. Peço a Deus para que te abençoe e te guarde sempre, e que Ele te fortaleça e te ajude a alcançar seus objetivos. Que seu casamento seja abençoado! Sempre pode contar comigo!

Ao meu noivo Felipe pelo apoio, amor e carinho. Espero sempre poder retribuir a confiança depositada em mim.

À minha grande família pelo carinho, amizade e companheirismo. Sei que com vocês sempre posso encontrar forças para prosseguir, além de razões para inúmeras risadas. Meu avô e minha avó, meus primos e primas, tios e tias...vocês estão e sempre estarão em meu coração. Bernardo ainda chegou para nos trazer mais alegria!

Aos meus eternos amigos Aimê, Vanessa e Alvaro. Depois de tantos anos nossa amizade ainda persiste e apesar de cada um ter tomado caminhos diferentes, tenho certeza de que será eterna. Sei que posso contar com vocês. Obrigada pelos incontáveis momentos de alegria, gargalhadas e de palhaçadas.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, por ter me recebido de braços abertos, me proporcionando experiências que contribuíram para minha formação não apenas profissional, mas também pessoal. Além de me possibilitar ingressar no curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais.

Ao Laboratório de Pesquisas e Estudos em Reflorestamento (LAPER), do Departamento de Silvicultura da UFRRJ e ao Laboratório de Leguminosas da Embrapa Agrobiologia por disponibilizar o espaço e os equipamentos para realização deste trabalho.

Ao meu orientador Dr. Guilherme Montandon Chaer e ao professor Dr. Paulo Sérgio dos Santos Leles pela orientação acadêmica, pelas oportunidades oferecidas e pelo aprendizado adquirido durante esse percurso. Obrigada pela grande ajuda e pela paciência!

Aos funcionários do Laboratório de Leguminosas, Marcelo, Adriana e Fernando, pela disponibilidade durante a realização deste trabalho.

Aos meus queridos colegas de mestrado, Marcelo e Thainá, que tive o prazer de conhecer e trabalhar durante esse período. Foram muitos trabalhos, provas, avaliações de campo e montagem de experimentos...creio que formamos uma boa equipe! Aos demais colegas de laboratório sempre dispostos a me ajudar, também fica meu agradecimento! Obrigada pelas inúmeras dúvidas sanadas Felipe Martini!

Aos funcionários da Casa de Vegetação e do Terraço, Ernani, Roberto, Aurélio, Alderi e tantos outros, obrigada pela ajuda e dedicação.

A Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE) pelo apoio ao grupo de estudos do LAPER, e pelo incentivo a pesquisa.

A Capes, pela bolsa de estudos concedida.

Aos professores e funcionários do curso de Engenharia Florestal do Instituto de Florestas da UFRRJ, pela dedicação e pelos ensinamentos.

A todos os demais amigos e colegas que não foram citados aqui, mas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e para meu desenvolvimento pessoal, meu sincero agradecimento.

## RESUMO

CAMPOS, Thaís de Oliveira. Lixiviação de metais pesados e macronutrientes em solos condicionados com biossólido de lodo de esgoto. 2017. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Departamento de Silvicultura, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

No Brasil, a possibilidade de geração de grandes quantidades de biossólido provenientes de estações de tratamento de esgoto nos próximos anos tem causado preocupação devido ao alto custo de sua disposição final em aterros sanitários. Soluções alternativas para sua reciclagem têm sido avaliadas sendo a mais promissora o uso do biossólido como adubo orgânico em atividades agrícolas e florestais. Entretanto, pela possibilidade de conter em sua composição, diversos poluentes, especialmente metais pesados, o uso continuado e sem critérios técnicos na agricultura ou atividade florestal pode resultar em aumento nos teores desses elementos no solo e no risco de contaminação de águas subterrâneas. Portanto, é necessário conhecer a dinâmica no solo dos metais pesados aportados via biossólido, a fim de direcionar o seu uso de forma ambientalmente segura. Um experimento foi conduzido em casa de vegetação na Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ, visando determinar a lixiviação de íons em um Latossolo Amarelo Distrófico de textura argilosa e em um Planossolo Háptico de textura arenosa, ambos condicionados com biossólido fornecido pela Estação de Tratamento de Esgoto da Ilha do Governador, Rio de Janeiro. Os solos foram acondicionados em colunas de PVC de 50 cm de comprimento e 10 cm de diâmetro e receberam doses de biossólido de 0, 0,5, 1 e 2 L/coluna. Um quinto tratamento consistiu na aplicação de uma formulação de fertilizantes minerais de modo a suprir macronutrientes em quantidades equivalentes à presente na dose de 1 L de biossólido. Foi aplicada uma lâmina de 140 mm por coluna, em volumes de 200 ml (23,3 mm), em intervalos de 2 horas durante 24 h. Procedeu-se à aplicação subsequente de 200 ml diariamente por aproximadamente 45 dias. Após cada adição de água, o lixiviado foi coletado e armazenado para análise. Foram avaliadas no lixiviado a condutividade elétrica (CE), e os teores de As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, B, Co, Fe, Mn, Ag, Se,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Al, Sb, V, Ca, K, Mg,  $\text{SO}_4^{2-}$  e Na. A CE no tratamento com fertilização mineral se mostrou superior a todos os demais nos dois tipos de solo. As lixiviações de As, Cd, Cr, Ni, Zn, B, Co, Mn, Ag, Se,  $\text{PO}_4^{3-}$ , K, Mg e  $\text{SO}_4^{2-}$  foram superiores no tratamento com fertilizante mineral em relação ao biossólido em ambos os solos. Ao contrário, os teores de nitrato, bário, cálcio e sódio lixiviados foram superiores nos tratamentos onde houve aplicação de biossólido. Não foi observada lixiviação de vanádio. As concentrações de metais pesados presentes na composição do biossólido estiveram abaixo do limite estabelecido pela legislação (Resolução CONAMA 375/2006) para uso agrícola e florestal do resíduo. Com relação ao potencial de contaminação do solo ou de águas subterrâneas e superficiais, as simulações realizadas mostraram a inexistência de riscos, tendo como base os limites admitidos pela legislação. Contudo, deve-se ressaltar o potencial de lixiviação de nitrato do biossólido, o qual apesar de se mostrar abaixo dos limites da legislação podem conferir potencial risco de contaminação de águas subterrâneas se doses acima de  $10 \text{ m}^3/\text{ha}$  forem aplicadas ao solo.

**Palavras-chave:** lodo de esgoto; biossólido; metais pesados; ensaio com colunas; lixiviação.

## ABSTRACT

CAMPOS, Thaís de Oliveira. Leaching of heavy metals and macronutrients in soils conditioned with sewage sludge biosolids. 2017. 78f. Dissertation (Master in Forest and Environmental Sciences). Forest Institute, Department of Silviculture, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2017.

In Brazil, the possibility of generating large amounts of biosolids from sewage treatment plants in the coming years has caused concern due to the high cost of their final disposal in landfills. Alternative solutions for its recycling have been evaluated, the most promising being the use of biosolids as organic fertilizer in agricultural and forestry activities. However, due to the possibility of containing several pollutants, especially heavy metals, the continuous use and without technical criteria in the agriculture or forestry activity can result in an increase in the levels of these elements in the soil and in the risk of contamination of groundwater. Therefore, it is necessary to know the dynamics in the soil of the heavy metals contributed via biosolid, in order to direct its use in an environmentally safe way. An experiment was conducted in a greenhouse at Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ, Brazil, to determine the leaching of ions in a Latossolo Distrófico with clayey texture and in a Planossolo Háplico of sandy texture, both conditioned with biosolids provided by the Sewage Treatment Station of Ilha do Governador, Rio de Janeiro. The soils were packed in PVC columns of 50 cm in length and 10 cm in diameter and received doses of biosolids of 0, 0,5, 1 and 2 L/column. A fifth treatment consisted of the application of a formulation of chemical fertilizers in order to supply macronutrients in amounts equivalent to that present in the dose of 1 L of biosolid. A 140 mm column of water was applied in 200 ml (23.3 mm) volumes at 2 hour intervals for 24 h. Subsequent application of 200 ml daily was performed for approximately 45 days. After each addition of water, the leachate was collected and stored for analysis. In the leachate, the electric conductivity (EC) and the contents of As, Ba, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, B, Co, Fe, Mn, Ag, Se,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ , Al, Sb, V, Ca, K, Mg,  $\text{SO}_4^{2-}$  and Na were evaluated. The EC in the treatment with mineral fertilization was superior to all the others in the two types of soil. The leaching of As, Cd, Cr, Ni, Zn, B, Co, Mn, Ag, Se,  $\text{PO}_4^{3-}$ , K, Mg and  $\text{SO}_4^{2-}$  were higher in the treatment with mineral fertilizer compared to biosolid in both soils. In contrast, nitrate, barium, calcium and sodium leachate contents were higher in the treatments where biosolids were applied. Vanadium leaching was not observed. The concentrations of heavy metals present in the biosolids composition were below the limit established by the legislation (CONAMA Resolution 375/2006) for agricultural and forestry use of the waste. Regarding the potential of contamination of soil or groundwater and surface water, the simulations carried out showed the absence of risks, based on the limits allowed by the legislation. However, the potential for nitrate leaching of biosolids, which despite being below the limits of the legislation may give rise to a potential risk of contamination of groundwater if doses above  $10 \text{ m}^3/\text{ha}$  are applied to the soil.

**Key words:** sewage sludge; biosolid; heavy metals; test with columns; leaching.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Reações que controlam as concentrações de metais presentes na solução do solo.. 10
- Figura 2.** (A) Colunas de PVC utilizadas como unidades experimentais apoiadas em estrutura montada para deixá-las na posição vertical. (B) Detalhe da adaptação acoplada à base das colunas de solo para coleta do líquido percolado. .... 15
- Figura 3.** Maior precipitação diária, por ano, de maio de 2001 a maio de 2016. Fonte: INMET, 2016. .... 16
- Figura 4.** Coleta do material lixiviado em frascos Erlenmeyers com funil acoplado e disposto abaixo das colunas de lixiviação. .... 17
- Figura 5.** Dinâmica da condutividade elétrica (mS) em amostras de lixiviado obtidas de colunas de 50 cm de altura preenchidas com um Planossolo de textura arenosa ou um Latossolo de textura argilosa, ambos condicionados com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido ou com fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Em cada evento de lixiviação foram aplicados 23,3 mm de água por coluna. .... 25
- Figura 6.** Dinâmica de lixiviação de prata (Ag) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 26
- Figura 7.** Dinâmica de lixiviação de alumínio (Al) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 27
- Figura 8.** Dinâmica de lixiviação de arsênio (As) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 28
- Figura 9.** Dinâmica de lixiviação de bário (Ba) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 29
- Figura 10.** Dinâmica de lixiviação de boro (B) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A

e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 30

**Figura 11.** Dinâmica de lixiviação de cádmio (Cd) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 31

**Figura 12.** Dinâmica de lixiviação de cobalto (Co) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 32

**Figura 13.** Dinâmica de lixiviação de cromo (Cr) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 33

**Figura 14.** Dinâmica de lixiviação de cobre (Cu) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 34

**Figura 15.** Dinâmica de lixiviação de ferro (Fe) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 35

**Figura 16.** Dinâmica de lixiviação de manganês (Mn) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 36

**Figura 17.** Dinâmica de lixiviação de níquel (Ni) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em

função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 37

**Figura 18.** Dinâmica de lixiviação de chumbo (Pb) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 38

**Figura 19.** Dinâmica de lixiviação de antimônio (Sb) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 39

**Figura 20.** Dinâmica de lixiviação de selênio (Se) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 40

**Figura 21.** Dinâmica de lixiviação de vanádio (V) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 41

**Figura 22.** Dinâmica de lixiviação de zinco (Zn) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 42

**Figura 23.** Dinâmica de lixiviação de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 43

**Figura 24.** Dinâmica de lixiviação de cálcio (Ca) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em

função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 44

**Figura 25.** Dinâmica de lixiviação de potássio (K) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 45

**Figura 26.** Dinâmica de lixiviação de magnésio (Mg) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 46

**Figura 27.** Dinâmica de lixiviação de sódio (Na) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 47

**Figura 28.** Dinâmica de lixiviação de fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 48

**Figura 29.** Dinâmica de lixiviação de sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado. .... 49

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Concentrações máximas de substâncias inorgânicas permitidas no lodo de esgoto (mg/kg) e carga acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação do lodo (kg/ha) de acordo com a Resolução CONAMA nº 375..... 5
- Tabela 2.** Limites máximos de metais pesados tóxicos admitidos em fertilizantes minerais que contenham o nutriente fósforo, micronutrientes ou com fósforo e micronutrientes em mistura com os demais nutrientes, e limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo. .... 6
- Tabela 3.** Valores orientadores para presença de substâncias inorgânicas em solo e em água subterrânea conforme Resolução CONAMA nº 420 de 2009. .... 7
- Tabela 4.** Fontes e quantidades de adubos minerais aplicados ao solo das colunas de lixiviação dos tratamentos utilizando fertilização mineral. As quantidades de N, P, K, Ca e Mg equivalem à presente na dose de 1 L/coluna de biossólido..... 13
- Tabela 5.** Características químicas e classe textural do Planossolo Háplico e do Latossolo Amarelo Distrófico utilizados para preenchimento das colunas de solo..... 14
- Tabela 6.** Volume de biossólido aplicado na camada de 0-25 cm das colunas de lixiviação, volume equivalente por cova de plantio de 8 L, percentual da cova ocupado por biossólido e dose equivalente de biossólido por hectare considerando 1250 covas/ha. .... 16
- Tabela 7.** Potencial agrônômico do biossólido de lodo de esgoto obtido na ETE Ilha do Governador do município do Rio de Janeiro, conforme Resolução CONAMA 375/06..... 20
- Tabela 8.** Teores de alguns metais pesados presentes no Planossolo, no Latossolo, na mistura de fertilizantes minerais e no biossólido. Os valores de metais admitidos no biossólido pela Resolução CONAMA 375/06 também são apresentados como referência. .... 21
- Tabela 9.** Teores de metais pesados no biossólido, carga acumulada teórica de metal por hectare e carga máxima teórica de biossólido por hectare definidos pela Resolução CONAMA 375/06 e para o biossólido produzido na ETE Ilha do Governador (ETE-IG)..... 21
- Tabela 10.** Valor de investigação para metais no solo agrícola estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, concentração de metal acumulado na cova de plantio após aplicação de 8 L de biossólido, e concentração de metal acumulado no solo considerando a aplicação de 10 m<sup>3</sup>/ha do biossólido da ETE IG em área total ou incorporados na camada arável (0 a 20 cm). .... 23
- Tabela 11.** Limite de metais em águas subterrâneas estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, quantidade de metal lixiviado estimado pela aplicação de 10 m<sup>3</sup>/ha de biossólido, percentual de metal lixiviado em relação ao adicionado via biossólido e concentração de metal estimada na água subterrânea após percolação de 140 mm..... 24

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>2</b>
2.1 Objetivos específicos .....	2
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
3.1 Disposição final do lodo de esgoto e potencial de uso como fertilizante florestal.....	3
3.2 Legislação referente à concentração de substâncias inorgânicas no ambiente e em insumos agrícolas .....	4
3.3 Metais pesados no biossólido.....	8
3.4 Metais pesados e comportamento no solo .....	9
3.5 Avaliação da lixiviação de compostos potencialmente contaminantes em ensaios com colunas .....	11
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
4.1 Montagem do experimento .....	13
4.2 Simulação de chuva e coleta do lixiviado das colunas .....	16
4.3 Análise química do lixiviado .....	17
4.4 Análise dos dados .....	17
4.4.1 Carga máxima de aplicação de biossólido .....	17
4.4.2 Análise de risco de contaminação de águas subterrâneas .....	18
4.4.3 Análise de risco de eutrofização de águas superficiais .....	18
4.4.4 Análise de risco de contaminação do solo .....	19
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
5.1 Potencial agrônômico do biossólido e teores de metais pesados no solo, fertilizante mineral e biossólido .....	20
5.2 Condutividade elétrica do lixiviado .....	24
5.3 Dinâmica de lixiviação de metais pesados.....	25
5.3.1 Prata (Ag).....	25
5.3.2 Alumínio (Al).....	26
5.3.3 Arsênio (As).....	27
5.3.4 Bário (Ba).....	28
5.3.5 Boro (B) .....	29
5.3.6 Cádmio (Cd).....	30
5.3.7 Cobalto (Co).....	31
5.3.8 Cromo (Cr).....	32
5.3.9 Cobre (Cu) .....	33
5.3.10 Ferro (Fe).....	34
5.3.11 Manganês (Mn) .....	35
5.3.12 Níquel (Ni).....	36
5.3.13 Chumbo (Pb) .....	37
5.3.14 Antimônio (Sb).....	38
5.3.15 Selênio (Se) .....	39
5.3.16 Vanádio (V).....	40

5.3.17	Zinco (Zn).....	41
5.4	Dinâmica de lixiviação de macroelementos.....	42
5.4.1	Nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ).....	42
5.4.2	Cálcio (Ca).....	43
5.4.3	Potássio (K).....	44
5.4.4	Magnésio (Mg).....	45
5.4.5	Sódio (Na).....	46
5.4.6	Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ).....	47
5.4.7	Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ).....	48
<b>6.</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
6.1	Qualidade do biossólido e risco de contaminação do solo .....	50
6.2	Risco ambiental: Água subterrânea.....	51
6.3	Lixiviação de ânions nitrato e fosfato .....	52
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>55</b>
<b>8.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>56</b>
<b>9.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>57</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A produção de biossólido, um subproduto do tratamento do lodo de esgoto gerado em estações de tratamento de esgoto (ETE's), vem aumentando em vários países devido ao aumento da população e melhorias nos sistemas de coleta e tratamento de esgoto. Como consequência, a gestão da produção de lodo de esgoto e do biossólido tornou-se um problema ambiental (PASSUELLO et al., 2012).

Apesar do uso do biossólido em atividades agrícolas e florestais, se mostrar promissor pelo seu alto conteúdo de materiais orgânicos e nutrientes, a presença de poluentes orgânicos e, sobretudo de metais pesados é motivo de preocupação (BERTONCINI E MATTIAZZO, 1999). Metais pesados e poluentes orgânicos persistentes podem levar à contaminação do solo, das culturas, das águas subterrâneas, águas abertas e, finalmente, atingir a cadeia alimentar humana (PASSUELLO et al., 2010).

A resolução CONAMA 375/06 especifica os níveis aceitáveis para a presença destas substâncias no biossólido destinado a fertilização florestal (BRASIL, 2006). Define ainda critérios e procedimentos para seu uso e restringe o uso de biossólido em áreas próximas a mananciais e cursos hídricos. Entretanto, é recomendável que antes da aplicação em larga escala do biossólido em plantações florestais seja compreendido seus efeitos no solo e nas plantas (ROCHA et al., 2004), uma vez que o uso continuado e sem critérios técnicos pode resultar em aumento nos teores de metais pesados no solo podendo, eventualmente, causar a contaminação de águas subterrâneas (LAMBAIS E CARMO, 2008).

Sendo assim, um maior conhecimento com relação ao comportamento desses elementos presentes no biossólido de lodo de esgoto é de grande relevância, visando orientar a aplicação desse resíduo de forma segura e com benefícios atrelados à qualidade do solo e produção das culturas. Espera-se com esse estudo obter informações sobre o nível de segurança da aplicação em campo do biossólido no que diz respeito ao risco de acúmulo de metais pesados no solo e da contaminação de águas subterrâneas e superficiais com esses metais ou nutrientes com potencial de eutrofização.



## **2. OBJETIVO GERAL**

Obter informações sobre o nível de segurança da aplicação de biossólido em plantios florestais, no que diz respeito ao acúmulo e à lixiviação de metais pesados, e à lixiviação de nutrientes com potencial de eutrofização de corpos d'água.

### **2.1 Objetivos específicos**

- I. Avaliar a dinâmica de lixiviação de metais e ânions de solos condicionados com biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais, por meio da técnica de ensaio com colunas;
- II. Avaliar a carga máxima de aplicação do biossólido utilizado com base na legislação vigente;
- III. Avaliar o risco de contaminação do solo com metais pesados em função do acúmulo de metais não-lixiviados;
- IV. Avaliar o risco de contaminação de águas subterrâneas com metais pesados e de eutrofização de corpos d'água a partir do lixiviado de solos condicionados com biossólido de lodo de esgoto;
- V. Comparar a dinâmica de lixiviação de metais e ânions entre solos com textura arenosa e textura argilosa.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Disposição final do lodo de esgoto e potencial de uso como fertilizante florestal

O esgoto coletado de residências e tratado em estações de tratamento de esgoto (ETEs) geram um subproduto denominado lodo de esgoto. Dependendo do tamanho da ETE o volume de lodo gerado diariamente pode chegar até cerca de 50 m<sup>3</sup> (informação provida pela Nova CEDAE, RJ). Esse lodo é composto em média por uma mistura de água (99,9%) e sólidos (0,1%), sendo que do total de sólidos, 70% são orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras, etc.) e 30% inorgânicos (areia, sais, metais, etc.). Para sua disposição final o lodo de esgoto deve ser tratado por processos que envolvem tanto a digestão anaeróbia quanto aeróbia, visando a redução dos sólidos biodegradáveis e odores, estabilizando a matéria orgânica, reduzindo o volume do lodo, odores e a presença de vetores (SANEPAR, 1999). Após as etapas de tratamento do lodo ele passa a ser denominado biossólido.

A disposição final do biossólido constitui um dos grandes problemas operacionais para as estações de tratamento de esgoto (ANDREOLI, 1999). No Brasil, normalmente o biossólido é disposto em aterros sanitários, apesar do grande potencial do uso deste material como fonte de nutrientes e matéria orgânica para fertilização de solos agrícolas ou florestais. Para esse uso, entretanto, o biossólido deve atender a padrões de qualidade definidos na resolução n° 375/2006 do CONAMA (BRASIL, 2006), a qual regulamenta e define critérios e procedimentos para a utilização agrícola/florestal do biossólido oriundo das ETEs.

Do ponto de vista agrônomico, o biossólido apresenta quantidades significativas de nutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas, sendo que a concentração destes elementos irá depender do esgoto que lhe originou e do processo de tratamento do esgoto e do lodo (ANDREOLI et al., 2001). Os elementos presentes em maior quantidade no biossólido são o nitrogênio e o fósforo, além da matéria orgânica que pode melhorar propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A matéria orgânica quando adicionada em solo argiloso, aumenta a quantidade de poros facilitando o desenvolvimento radicular e circulação de ar e de água. Em solos de textura arenosa, sua adição melhora a agregação das partículas do solo e possibilita maior retenção de água e nutrientes, este último pelo aumento da CTC.

A aceitação internacional da utilização de biossólidos em florestas aumentou ao longo das últimas décadas devido aos numerosos estudos de campo que resultaram em uma forte base teórica favorável ao seu uso (SMITH E CARNUS, 1997). Segundo Khai (2007), metade do lodo de esgoto produzido nos Estados Unidos é aplicado a solos agrícolas e florestais, enquanto que na comunidade europeia esse percentual é de 30%. Dados de 2005 indicavam que cerca de 0,25 milhões de toneladas/ano (em peso seco) de lodo de esgoto eram produzidos na Austrália, sendo um terço do biossólido gerado aplicado na agricultura (MOLLOY et al., 2005). Em 2004, a estimativa de produção de lodo no Brasil era de 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano (SOARES, 2004). Dados recentes estimaram a produção diária de lodo no estado do Rio de Janeiro, considerando que a produção de esgotos no Brasil esteja situada entre 80 a 200 litros/habitantes/dia, e que a produção nas ETEs do estado seja de 350 g/m<sup>3</sup> de esgoto tratado. Aplicando-se essas estimativas aos municípios do Estado que contam com ETEs estima-se que sejam geradas 365 toneladas de lodo diariamente ou 133 mil toneladas por ano (PERS, 2013). Essa estimativa para o estado do Rio de Janeiro indica que a produção atual de lodo no Brasil é muito superior àquela estimada por Soares (2004) há mais de uma década.

No Brasil, vários estudos têm mostrado o grande potencial de uso de biossólido para produção de mudas de espécies florestais. Trazzi et al. (2014), estudando diferentes

concentrações de biossólido para produção de mudas de *Tectona grandis*, concluíram que as mudas produzidas nos substratos formulados com biossólido e casca de arroz carbonizada apresentaram as maiores médias de altura e massa seca da parte aérea, enquanto que as produzidas com biossólido e fibra de coco obtiveram as maiores médias de diâmetro do coleto, em comparação com o substrato comercial. Delarmelina et al. (2014), em estudo com objetivo de avaliar diferentes proporções de lodo de esgoto, fibra de coco, vermiculita e casca de arroz *in natura* como substrato na produção de mudas de *Sesbania virgata*, apontaram que os tratamentos com lodo de esgoto e vermiculita, principalmente nas proporções de 60% e 40% respectivamente, proporcionaram os melhores crescimentos em altura e diâmetro do coleto e aumentaram a produção de massa seca total das mudas.

A aplicação de biossólido em plantios florestais resultou em maior produtividade comparativamente a áreas onde não foi aplicado esse material e, em alguns casos (geralmente com a adição de adubo potássico), superam a produtividade de plantios onde foi realizada adubação química com doses ótimas recomendadas (NETO et al., 2007). Lemainski e Silva (2006), avaliando o uso do biossólido como fertilizante para soja, concluíram que áreas que receberam 30 t/ha de biossólido (peso úmido) resultaram em produção 18% superior aos tratamentos com fertilizante mineral.

Nos EUA, estudos mostram maiores respostas à aplicação de biossólido do que à fertilizantes nitrogenados, além do efeito ser mais longo (ASSENHEIMER, 2009). No Brasil, na cultura de eucalipto obteve-se um aumento de 37% na produtividade quando se aplicou 10 t/ha de biossólido juntamente com fósforo em comparação à adubação química aos 22 meses de idade (GONÇALVES et al., 2000). Em outro estudo, Trannin et al. (2005) também concluíram que a utilização de 10 Mg ha<sup>-1</sup> em base seca de biossólido, suplementada com K<sub>2</sub>O e 30% da exigência em P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, proporciona uma produtividade de milho equivalente à que se obtém com adubação mineral completa e que a aplicação do biossólido industrial na cultura do milho é economicamente viável até a uma distância de 66 km da fonte geradora.

### **3.2 Legislação referente à concentração de substâncias inorgânicas no ambiente e em insumos agrícolas**

O biossólido pode apresentar em sua composição, poluentes como metais pesados, compostos orgânicos persistentes e organismos patogênicos ao homem (BETTIOL E CAMARGO, 2006), representando um potencial risco sanitário e ambiental. A presença destes poluentes ou organismos no lodo ou no biossólido também irá depender das características do esgoto bruto e do sistema de tratamento empregado que resultou na geração do lodo e do biossólido.

Desse modo, em 2006 o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou a Resolução nº 375, específica para o uso de lodo de esgoto, definindo critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. Esta resolução impõe a necessidade da caracterização do lodo quanto ao potencial agrônomo, quanto à presença de substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas (indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos) e quanto à estabilidade. A resolução especifica os níveis aceitáveis para a presença dos metais pesados arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, crômio, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco no lodo de esgoto destinado a fertilização florestal (Tabela 1), além dos níveis máximos aceitáveis de agentes patogênicos ao homem, sendo o material definido como lodo tipo A ou tipo B em decorrência da concentração de patógenos. Restringe ainda o uso deste material quanto aos locais e formas de aplicação e em determinadas culturas, além de definir frequências de monitoramento das características do lodo.

**Tabela 1.** Concentrações máximas de substâncias inorgânicas permitidas no lodo de esgoto (mg/kg) e carga acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação do lodo (kg/ha) de acordo com a Resolução CONAMA nº 375.

Substância inorgânica	Concentração máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)	Carga acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação do lodo de esgoto ou produto derivado (kg/ha)
Arsênio	41	30
Bário	1300	265
Cádmio	39	4
Chumbo	300	41
Cobre	1500	137
Cromo	1000	154
Mercúrio	17	1,2
Molibdênio	50	13
Níquel	420	74
Selênio	100	13
Zinco	2800	445

Para as águas subterrâneas existe ainda a Portaria 518/04 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004), que visa a assegurar a qualidade da água a ser consumida após tratamento prévio e estabelece os padrões de potabilidade para substâncias químicas que representam riscos para saúde.

Em 2006, a Instrução Normativa nº 27 do Ministério da Agricultura dispôs a respeito dos fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes, para serem produzidos, importados ou comercializados. Estes devem atender aos limites que são estabelecidos nos referidos anexos da resolução no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas. A instrução trata dos fertilizantes de forma separada de acordo com a composição do mesmo, sendo o anexo I referente aos limites máximos de metais pesados permitidos em fertilizantes minerais que contenham fósforo, micronutrientes ou com ambos em mistura com os demais nutrientes, além dos limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo (Tabela 2). No seu anexo 2, tem-se os limites máximos de metais permitidos para fertilizantes que contenham nitrogênio, potássio, macronutrientes secundários, para os que possuem até 5% de  $P_2O_5$  e para os demais que não se encontram especificados no anexo 1. O anexo 3 especifica os limites admitidos em corretivos de acidez, alcalinidade, sodicidade e para silicato de cálcio e magnésio, carbonato de cálcio e magnésio e escória silicatada. No anexo 4 tem-se os limites máximos referentes aos contaminantes presentes em substrato para plantas e condicionadores de solo. Por fim, no anexo 5, tem-se os limites máximos de contaminantes permitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo.

**Tabela 2.** Limites máximos de metais pesados tóxicos admitidos em fertilizantes minerais que contenham o nutriente fósforo, micronutrientes ou com fósforo e micronutrientes em mistura com os demais nutrientes, e limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo.

Metal pesado	Valor admitido em mg/kg por ponto % de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e por ponto % da somatória de micronutrientes		Valor máximo admitido em mg/kg na massa total do fertilizante		Limite admitido para contaminantes em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo (mg/kg)
	Coluna A <sup>1</sup>	Coluna B <sup>2</sup>	Coluna C <sup>3</sup>	Coluna D <sup>4</sup>	
As	2	500	250	4.000	20
Cd	4	15	57	450	3
Pb	20	750	1.000	10.000	150
Cr	40	500	-	-	-
Hg	0,05	10	-	-	1
*Cr <sup>+6</sup>	-	-	-	-	2
Ni	-	-	-	-	70
Se	-	-	-	-	80

<sup>1</sup> Aplicável a P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; <sup>2</sup> Aplicável a somatório da garantia de micronutrientes; <sup>3</sup> Aplicável aos fertilizantes minerais mistos e complexos com garantia de macronutrientes primários e micronutrientes; <sup>4</sup> Aplicável aos fertilizantes fornecedores exclusivamente de micronutrientes e aos fertilizantes com macronutrientes secundários e micronutrientes. \*Alterada pela Instrução Normativa nº 7 de 12/04/2016 (MAPA).

Fonte: Brasil, 2006.

Conforme decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que regulamenta a lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, fertilizante orgânico é um produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais. Desse modo, alguns autores consideram o lodo de esgoto um biofertilizante e condicionador do solo (GUEDES et al., 2006; BARBOSA E TAVARES FILHO, 2006; PIRES E MATTIAZZO, 2008). Entretanto, devido à necessidade de sua disposição de forma adequada à proteção do meio ambiente e da saúde da população; por ser uma potencial fonte de riscos à saúde pública e ao ambiente e potencializarem a proliferação de vetores de moléstias e organismos nocivos e por serem resíduos que podem conter metais pesados, compostos orgânicos persistentes e patógenos em concentrações nocivas à saúde e ao meio ambiente, a Resolução CONAMA 375/2006 estabeleceu regras específicas para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário.

Segundo Hooda (2010), as concentrações de metais em fertilizantes minerais são decorrentes das matérias-primas utilizadas na produção do insumo ou são introduzidas durante a fabricação. As matérias-primas utilizadas na produção de fertilizantes fosfatados e micronutrientes são as principais fontes de contaminação dos fertilizantes por metais pesados (BRASIL, 2006). Fertilizantes fosfatados são produzidos a partir de fluorapatitas, hidroxiapatitas e cloroapatitas, as quais podem apresentar alto grau de substituição isomórfica e, logo, conter elevadas concentrações de metais pesados. O Ca<sup>2+</sup> por exemplo, pode ser substituído pelo cádmio devido à semelhança existente entre os raios iônicos de ambos na

valência +2 (BOISSON, et al., 1999; RIBEIRO DO VALLE, 2012). As concentrações de As, Cd e Pb em rochas fosfatadas no mundo variam de 3 a 79 mg/kg, 0,5 a 150 mg/kg e de <1 a 55 mg/kg, respectivamente (HOODA, 2010). No Brasil, em estudo realizado por Amaral Sobrinho et al. (1992), em fertilizantes fosfatados e fertilizantes fosfatados com micronutrientes foram encontrados até 14,6 mg/kg de Cd e de 275 mg/kg de Pb.

Durante a fabricação do superfosfato simples, a rocha fosfática é tratada com ácido sulfúrico. Se este ácido é reaproveitado da fundição de zinco ou sulfeto de chumbo, existe também a possibilidade de introdução de chumbo, cádmio e outros metais pesados no processo (RIBEIRO DO VALLE, 2012). O superfosfato triplo é produzido pela acidulação de rocha fosfática com ácido fosfórico, e dependendo da rocha fosfática esse tipo de fertilizante pode apresentar 10 mg/kg a mais de cádmio em relação ao superfosfato simples (RIBEIRO DO VALLE, 2012).

Em 2009 o CONAMA publicou a resolução nº 420 que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Esta resolução surge a partir do documento elaborado pela CETESB em 2005, e segundo seu Art. 8º, que os valores de referência de qualidade do solo para substâncias químicas naturalmente presentes serão estabelecidos pelos órgãos ambientais competentes dos Estados e do Distrito Federal, além de alterações em alguns valores de intervenção para água subterrânea (Tabela 3).

**Tabela 3.** Valores orientadores para presença de substâncias inorgânicas em solo e em água subterrânea conforme Resolução CONAMA nº 420 de 2009.

Substâncias Inorgânicas	Solo (mg.kg <sup>-1</sup> de peso seco)					Água Subterrânea (µg.L <sup>-1</sup> )
	Referência de Qualidade (VRQ)	Prevenção (VP)	Investigação (VI)			
			Agrícola (Área de Proteção Máxima)	Residencial	Industrial	
Alumínio	E	-	-	-	-	3500**
Antimônio	E	2	5	10	25	5*
Arsênio	E	15	35	55	150	10*
Bário	E	150	300	500	750	700*
Boro	E	-	-	-	-	500
Cádmio	E	1,3	3	8	20	5*
Chumbo	E	72	180	300	900	10*
Cobalto	E	25	35	65	90	70
Cobre	E	60	200	400	600	2000*
Cromo	E	75	150	300	400	50*
Ferro	E	-	-	-	-	2450**
Manganês	E	-	-	-	-	400**
Mercúrio	E	0,5	12	36	70	1*
Molibdênio	E	30	50	100	120	70
Níquel	E	30	70	100	130	20

Continua

**Tabela 3.** Valores orientadores para presença de substâncias inorgânicas em solo e em água subterrânea conforme Resolução CONAMA nº 420 de 2009.

Substâncias Inorgânicas	Solo (mg.kg <sup>-1</sup> de peso seco)					Água Subterrânea (µg.L <sup>-1</sup> )
	Referência de Qualidade (VRQ)	Prevenção (VP)	Investigação (VI)			
			Agrícola (Área de Proteção Máxima)	Residencial	Industrial	
N-Nitrato	E	-	-	-	-	10000*
Prata	E	2	25	50	100	50
Selênio	E	5	-	-	-	10*
Vanádio	E	-	-	-	1000	-
Zinco	E	300	450	1000	2000	1050**

Fonte: CONAMA, 2009. \*Padrões de potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde definidos na Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde. \*\*Valores calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo desta Resolução. Diferem dos padrões de aceitação para consumo humano definidos na Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde e dos valores máximos permitidos para consumo humano definidos no Anexo I da Resolução CONAMA nº 396/2008.

### 3.3 Metais pesados no biossólido

Apesar dos benefícios advindos da aplicação de biossólido nas atividades agrícolas e florestais, são necessárias pesquisas para comprovar que o seu uso continuado não acarreta em impactos ambientais, especialmente pela presença de altos teores de alguns nutrientes e presença de metais pesados, ainda que dentro dos limites da legislação. Esses potenciais impactos são a contaminação de lençóis e cursos de água, a eutrofização de corpos de água e a bioacumulação de metais na cadeia alimentar. Portanto, são necessários estudos sobre o comportamento dos nutrientes e metais pesados provenientes do biossólido aplicado em sistemas agrícolas e florestais para nortear o seu uso e, se necessário, definir doses e frequência de aplicações ambientalmente seguras.

Estudos sobre a movimentação de metais pesados em solos tratados com biossólido sugerem que a quantidade de lixiviados pode ser sensivelmente maior em solos arenosos com baixos teores de matéria orgânica e sujeitos a chuvas intensas. De um modo geral, os metais pesados adicionados ao solo via aplicação de biossólido permanecem retidos na camada superficial por processos de adsorção ou complexação, até que mudanças ocorram no sistema (TAYLOR et al., 1995). No Brasil, estudos têm demonstrado que os metais Cr, Cu, Ni e Pb presentes no biossólido apresentam baixa mobilidade, acumulando-se na camada do solo onde o biossólido foi incorporado. No entanto, o Zn e principalmente o Cd são relativamente móveis e, portanto, apresentam maior potencial para contaminar o subsolo e as águas subterrâneas (OLIVEIRA, 2000).

Geralmente são recomendadas dosagens elevadas de biossólido visando suprir a demanda de macronutrientes às culturas, especialmente de nitrogênio e fósforo. No entanto, altas dosagens podem levar à contaminação de lençóis freáticos pela lixiviação de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e de fosfatos orgânicos, formas desses elementos bastante móveis no solo e, portanto, sujeitas à lixiviação no perfil do solo (CORREA et al., 2006).

Anjos e Mattiazzo (2000) estudaram a lixiviação de nitratos e dos elementos K, Ca, Mg, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb e Zn em Latossolo Amarelo distrófico e Latossolo Vermelho distrófico em vasos repetidamente tratados com biossólido em dose cumulativa equivalente a

388 Mg/ha. Ao longo de 12 meses foi verificado que as repetidas aplicações de biossólido ocasionaram aumento da condutividade elétrica dos solos, e das quantidades de metais lixiviados, sendo  $K > Mg > Ca$ . A quantidade de nitrato lixiviada atingiu valores de até 96 mg/L e não foi observada lixiviação de metais pesados.

### **3.4 Metais pesados e comportamento no solo**

O termo metal pesado aplica-se aos elementos que possuem densidade maior que 5 g/cm<sup>3</sup> e número atômico superior a 20 (MALAVOLTA, 1994). Possuem ainda características como aparência brilhante e boa condutividade elétrica. São conhecidos também como elementos traço ou metais traço (MENESES, 2008). Os metais mais característicos são o arsênio (As), o cádmio (Cd), o chumbo (Pb), o cromo (Cr), o cobre (Cu), o ferro (Fe), o níquel (Ni), o manganês (Mn), o mercúrio (Hg) e o zinco (Zn). Entre estes, o arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio não são associados a nenhuma função biológica.

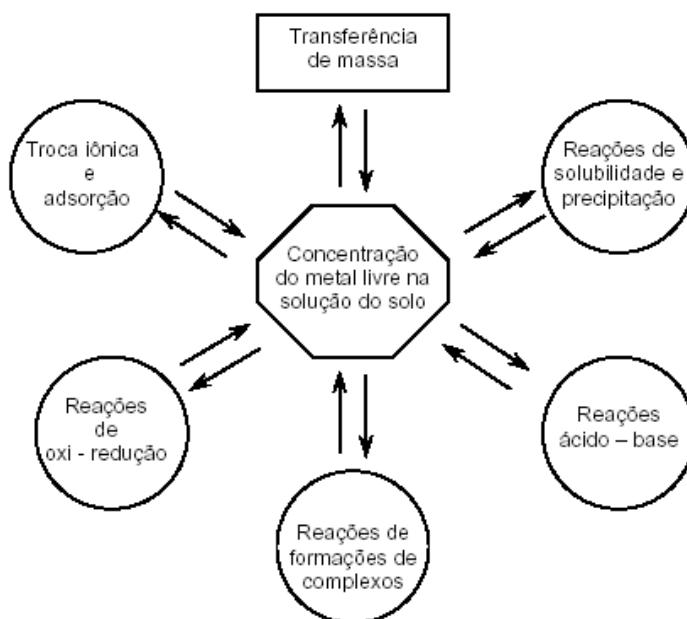
O comportamento dos metais no solo irá depender de uma combinação de diversos fatores, dentre eles os teores de óxidos de Fe, Al e Mn, o pH, o teor de matéria orgânica, a textura, o potencial redox, a competição entre metais pelos sítios de adsorção, a temperatura e a atividade microbiana (BERTONCINI E MATTIAZZO, 1999; OLIVEIRA E MATTIAZZO, 2001). Tais fatores influenciam nas reações de adsorção/dessorção, precipitação/dissolução, complexação e oxirredução, interferindo na maior ou menor mobilidade dos metais. De acordo com Costa (2005), o solo apresenta capacidade de inativar materiais potencialmente prejudiciais ao meio ambiente, por exemplo, através de processos de adsorção, precipitação e complexação. Alguns solos apresentam grande capacidade de retenção de metais, porém, se essa capacidade for ultrapassada, os metais presentes no meio podem sofrer lixiviação, colocando em risco a qualidade de águas subterrâneas e superficiais, e podendo entrar na cadeia alimentar.

A toxicidade dos metais pesados ou elementos potencialmente tóxicos depende tanto do teor quanto da forma química sob a qual se apresentam no solo (VELASCO MOLINA, 2004). É importante ressaltar que todos os metais pesados estão presentes de forma natural em solos e em sistemas aquáticos superficiais e subsuperficiais, mesmo que não haja ação antrópica no ambiente. Os metais pesados podem ser encontrados no solo em razão de processos como o intemperismo da rocha matriz, especialmente das rochas ricas em sulfetos, óxidos, silicatos, fosfatos e carbonatos (MALAVOLTA, 1994). No entanto, altas concentrações de metais no solo e na água geralmente são decorrentes de atividades antropogênicas como o despejo de rejeitos industriais, efluentes domésticos, insumos agrícolas, descarte de produtos comerciais, queima de combustíveis fósseis, descarte de lodo de esgoto e rejeitos de áreas de mineração e garimpos (ALLEONI et al., 2005).

A mobilidade dos metais pesados no solo é dependente dos teores e tipos de argila, do pH, da capacidade de troca de cátions e do teor de matéria orgânica. Em geral, o aumento do pH torna os metais menos solúveis e menos disponíveis às plantas em razão da formação de precipitados com hidróxidos e carbonatos, aumento da intensidade de adsorção dos metais aos colóides do solo e à maior estabilidade dos complexos que se formam entre os metais e a fração húmica do solo (MARQUES et al, 2001). Assim, exceto para As, Mo, Se e alguns estados de valência do Cr, os metais pesados têm sua disponibilidade reduzida quando há elevação do pH. A elevação do pH também causa o incremento da adsorção específica, em função do aumento do balanço de carga negativa na superfície de argilas, sendo que esse efeito é mais pronunciado em solos com carga variável (SIMÃO E SIQUEIRA, 2001). Várias reações químicas, como de oxi-redução, ácido-base, precipitação, complexação, adsorção e troca iônica, também afetam o comportamento dos metais pesados no solo, interferindo na sua



distribuição sob diferentes formas químicas (Figura 1). Essas reações regulam a quantidade do metal presente de forma livre na solução do solo, forma essa, de maior mobilidade e disponibilidade às plantas e outros organismos (VELASCO MOLINA, 2004). Desse modo, os metais podem estar presentes no solo nas seguintes formas: (1) iônica ou complexada na solução do solo na forma de complexos solúveis; (2) na forma trocável, como íons retidos no complexo de troca por força eletrostática na superfície dos colóides do solo; (3) como íons mais firmemente ligados aos complexos de troca ou como parte integrante de complexos orgânicos e coprecipitados em sesquióxidos de ferro, alumínio e manganês; (4) precipitados como sais insolúveis; (5) incorporados em microrganismos, imobilizados em células vivas e recentemente mortas e (6) presos nas estruturas cristalinas de minerais primários e secundários.



**Figura 1.** Reações que controlam as concentrações de metais presentes na solução do solo. Fonte: VELASCO MOLINA (2004).

A disponibilidade e a toxicidade dos metais pesados dependem das formas que estes se encontram no solo. Maiores teores nas frações lábeis apontam para uma maior mobilidade e biodisponibilidade desses elementos. As frações lábeis referem-se aos íons livres em solução e os íons que se apresentam adsorvidos através do mecanismo de formação de complexo de esfera externa. Com isso, espera-se que menores valores sejam encontrados nessa fração, significando que a maior parte do elemento estará nas formas químicas mais estáveis, sendo menos biodisponíveis.

Através de estudos de fracionamento de metais pesados, Amaral Sobrinho et al. (1997) e Gomes et al. (1997) inferiram sobre a importância dos óxidos de Fe e Al na retenção de metais, por meio de mecanismos de adsorção específica e/ou co-precipitação. Por exemplo, os óxidos de Fe e Al podem exercer influência na concentração de As nos solos, uma vez que se tem predomínio das formas iônicas  $AsO_2^-$ ,  $HAso_4^{2-}$  e  $H_2AsO_3^{2-}$ , sendo sua mobilidade proporcional ao conteúdo do elemento adicionado e inversamente proporcional ao tempo e ao conteúdo de ferro e alumínio (KABATA-PENDIAS, 2011). Cu e Zn também são adsorvidos

por óxidos de ferro, alumínio e de manganês (CAMARGO, 2006) que possuem elevada capacidade de adsorção e oclusão de metais pesados (AMARAL SOBRINHO et al., 2009).

A presença de outros cátions no solo também pode influenciar no comportamento dos metais. Em experimentos com solos onde foi feita aplicação de  $\text{CaSO}_4$ , foi verificado aumento no Ca trocável seguido de lixiviação de Mn e Al (PAVAN et al., 1984). Também foi observado que a adição de soluções salinas exerce influência sobre essa mobilidade. Bertoncini e Mattiazzo (1999), buscando avaliar o comportamento de metais provenientes da aplicação de lodo de esgoto em três diferentes tipos de solo, verificaram que a adição das soluções de KCl e  $\text{K}_2\text{SO}_4$  elevaram a mobilidade de alguns metais como Cd, Cr, Cu e Ni, apesar de essa mobilidade estar sempre abaixo de 2% do total adicionado.

A mobilidade de metais no solo pode ser acelerada em condições de campo pelo fluxo preferencial da solução do solo no perfil, assim como pela formação de complexos facilmente transportáveis de metais e ligantes orgânicos. Embora o solo atue como uma barreira natural de proteção aos aquíferos subterrâneos, os fatores que determinam sua capacidade de retenção de metais são complexos, dificultando seu entendimento e a possibilidade de prever o comportamento desses metais no solo, especialmente, uma previsão em longo prazo (OLIVEIRA E MATTIAZZO, 2001). A mobilidade dos metais é então variável, de acordo com sua natureza, forma química e características físicas, químicas e biológicas do solo.

### **3.5 Avaliação da lixiviação de compostos potencialmente contaminantes em ensaios com colunas**

O uso de colunas de solo foi originalmente desenvolvido para avaliar a lixiviação de pesticidas no solo, em vista do potencial de contaminação de águas subterrâneas. A coluna é preenchida com solo imitando o perfil do solo sob condições de campo, permitindo simular em pequena escala os acontecimentos no decorrer do perfil do solo quando determinada substância é aplicada. As colunas geralmente são montadas em tubos de PVC recobertos por uma camada de parafina em sua face interna, visando evitar o fluxo preferencial do material percolado pelas laterais do mesmo. As amostras de solo coletadas são acondicionadas na coluna de acordo com as camadas apresentadas no campo. As colunas são então colocadas na posição vertical e deixadas sob simulador de chuva. Na extremidade inferior é acoplado um recipiente permitindo a coleta do percolado.

Análises dos processos de transporte de solutos no perfil do solo utilizando a metodologia de colunas possibilita a obtenção de dados em laboratório, a partir dos quais são geradas informações que poderão ser aplicadas em campo, uma vez que as colunas são preenchidas com as camadas de solo o mais próximo possível da condição original e a partir da aplicação de quantidades de água que simulam àquelas decorrentes de precipitações naturais (BOEIRA E SOUZA, 2005). Logo, o método de colunas de solo pode ser utilizado para várias finalidades, entre elas para avaliação da lixiviação de metais pesados no perfil do solo decorrentes da aplicação de diversos tipos de compostos ao solo, a exemplo do biossólido de lodo de esgoto.

O poder contaminante de um metal pesado pode ser caracterizado pelo seu potencial de movimentação no solo. Dentre os metais pesados presentes no biossólido, o Cd é uma importante fonte potencial de contaminação (ROBARDS, 1991). Contudo, estudos de lixiviação de Cd em colunas preenchidas com Latossolo Vermelho e Nitossolo, ambos adicionadas de biossólido contaminado com Cd, indicaram que esse elemento não sofreu percolação, não transpondo uma massa de solo de 60 cm. A baixa mobilidade do Cd observada nesses dois tipos de solo estudados indica a possibilidade de acumulação em solos que recebam cargas frequentes desse elemento via aplicação de biossólido (PRADO E

JULIATTI, 2003). Os autores justificam a baixa mobilidade do Cd na coluna à alta afinidade deste com as frações da matéria orgânica do solo e do biossólido. Bertoncini e Mattiazzo (1999), utilizando colunas de solo, estudaram a mobilidade de metais pesados em solos de diferentes texturas e tratados sucessivamente com lodo de esgoto, além dos efeitos da adição de KCl e K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (sais normalmente presentes em fertilizantes) na mobilidade dos metais. Os autores concluíram que a adição dos sais aumentou a mobilidade de Cd, Cr, Cu e Ni, porém, esse aumento se manteve abaixo de 2% do total adicionado. A retenção destes metais também aumentou com a elevação nos teores de Fe dos solos. A menor mobilidade desses metais também foi em consequência dos elevados valores de pH e aumento no teor de matéria orgânica proporcionados pela adição de lodo de esgoto.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Montagem do experimento

O estudo foi realizado na Embrapa Agrobiologia, localizada no município de Seropédica, RJ. Foi desenvolvido um ensaio utilizando colunas de solo visando determinar a lixiviação de elementos químicos a partir de solos condicionados com diferentes doses de biossólido. O biossólido utilizado no estudo foi originado da estação de tratamento de esgoto da Ilha do Governador (ETE Ilha do Governador), localizada no município do Rio de Janeiro. A ETE Ilha do Governador é operada pela Companhia Estadual de Águas e Esgotos do Rio de Janeiro (Nova CEDAE), sendo o esgoto tratado, derivado de áreas urbanas domiciliares e comerciais, não contendo resíduos industriais.

O experimento foi montado seguindo esquema fatorial 2 x 5 com três repetições, em delineamento inteiramente casualizado. Os fatores estudados foram “tipo de solo” com dois níveis: solo de textura arenosa e solo de textura argilosa e “doses de biossólido ou fertilizante mineral” com cinco níveis, sendo três de biossólido: 0,5, 1 e 2 L de biossólido/coluna, uma dose de fertilizante mineral e testemunha absoluta, que não recebeu biossólido ou fertilizante. As fontes e quantidades aplicadas de fertilizantes minerais foram definidos de modo a prover quantidades de N, P, K, Ca e Mg aproximadas às existentes na dose de 1 L de biossólido aplicados em g/cova (Tabela 4). Foram aplicados 5,5, 10,8, 4,8, 11,3 e 2,7 g de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, sendo estas as quantidades encontradas na dose 1 L de biossólido. O que totalizou 27,4, 22,6, 30,2, 8,3, 26,9 e 5,0 g de sulfato de amônia, fosfato natural, superfosfato simples, cloreto de potássio, cloreto de magnésio e FTE BR-12, respectivamente. O total de 9,6 g de enxofre foi adicionado devido à aplicação de sulfato de amônia e superfosfato simples.

**Tabela 4.** Fontes e quantidades de adubos minerais aplicados ao solo das colunas de lixiviação dos tratamentos utilizando fertilização mineral. As quantidades de N, P, K, Ca e Mg equivalem à presente na dose de 1 L/coluna de biossólido.

Fonte	Quantidade aplicada (g)	Quantidade aplicada por nutriente (g)					
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	S
Sulfato de amônia	27,4	5,5	-	-	-	-	6,3
Fosfato natural	22,6	-	5,4	-	5,6	-	-
Superfosfato simples	30,2	-	5,4	-	5,7	-	3,3
Cloreto de potássio	8,3	-	-	4,8	-	-	-
Cloreto de magnésio*	26,9	-	-	-	-	2,7	-
FTE BR-12**	5,0	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAIS</b>	<b>120</b>	<b>5,5</b>	<b>10,8</b>	<b>4,8</b>	<b>11,3</b>	<b>2,7</b>	<b>9,6</b>

\*MgCl<sub>2</sub>.6H<sub>2</sub>O; \*\*Elementos traços fritos na composição comercial BR-12.

A tabela 5 apresenta as características químicas dos dois tipos de solo utilizados para montagem das colunas. Os solos utilizados foram um Latossolo Amarelo Distrófico (FONSECA, 2010) de textura argilo arenosa, coletado na área da empresa Cerâmica Vulcão Ltda localizada no município de Queimados/RJ, e um Planossolo Háptico (SANTOS, 2015) de textura arenosa, coletado no campo experimental da Embrapa Agrobiologia localizada no município de Seropédica/RJ.

**Tabela 5.** Características químicas e classe textural do Planossolo Háplico e do Latossolo Amarelo Distrófico utilizados para preenchimento das colunas de solo.

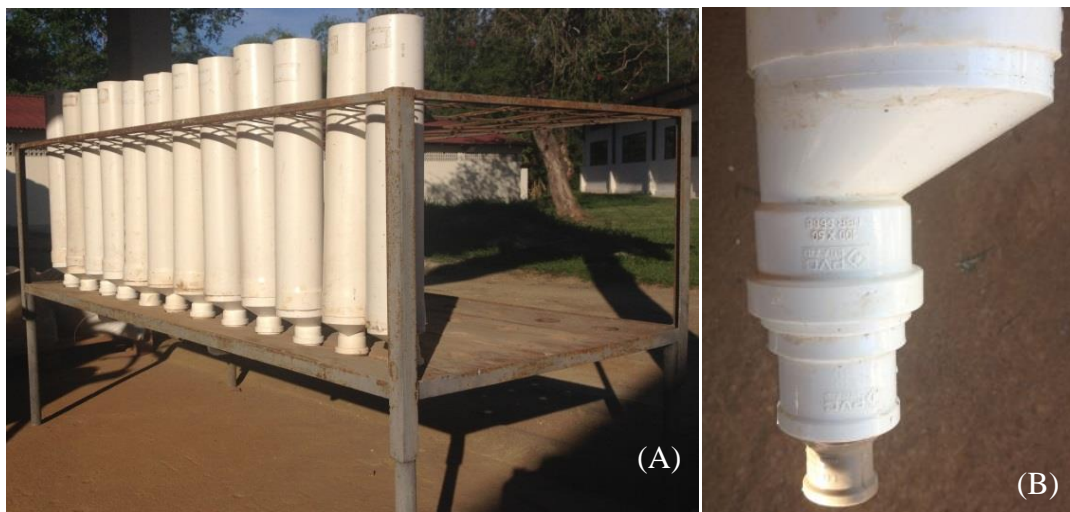
Característica	Unidade	Planossolo (0-25 cm)	Latossolo (0-25 cm)
pH	-	6,0	4,3
MO	g.dm <sup>-3</sup>	7,6	22
N	g.dm <sup>-3</sup>	0,4	1,2
P	mg.dm <sup>-3</sup>	17,9	16
K	mg.dm <sup>-3</sup>	47,7	14
Ca <sup>+2</sup>	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	0,9	1,7
Mg <sup>+2</sup>	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	0,45	0,5
Al <sup>+3</sup>	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	0	0,2
H+Al	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	2,06	3
SB	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	0,68	2,34
CTC	cmol <sub>c</sub> .dm <sup>-3</sup>	2,2	5,34
V	%	29,8	44
Classe textural	-	Arenosa	Argilosa

MO – colorimétrico; N - Kjeldahl; P – colorimétrico; K – fotometria de chama; Ca e Mg – absorção atômica; Al e H+Al – titulação; pH – potenciometria.

O biossólido de lodo de esgoto utilizado foi caracterizado quanto ao seu potencial agrônomo, conforme determinado pela Resolução CONAMA 375/06. Sendo analisados carbono orgânico, fósforo, nitrogênio Kjeldahl, nitrogênio amoniacal, nitrogênio nitrato-nitrito, pH (em água 1:10), potássio, sódio, enxofre, cálcio, magnésio, umidade (a 60 – 65 °C), sólidos voláteis e sólidos totais. Foram analisados ainda, os teores de metais pesados, que devem respeitar limites de concentração máximos determinados pela resolução (arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco).

Uma mistura contendo os 6 fertilizantes minerais utilizados também foi analisada quanto aos teores de metais pesados (arsênio, cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, níquel e selênio), assim como amostras do Planossolo e Latossolo.

As unidades experimentais consistiram de colunas de PVC de 10 cm de diâmetro e 50 cm de altura. Na extremidade inferior foi colocada uma malha plástica perfurada para evitar a perda de solo e uma conexão cônica, formando um funil, para facilitar a coleta do líquido de percolação durante o período de lixiviação (Figura 2). O volume dessa conexão foi preenchido com brita N° 1, de maneira a facilitar a drenagem do líquido percolado e dar sustentação ao solo sobre a malha plástica situada entre o solo e a brita. A brita utilizada foi previamente lavada em solução de ácido clorídrico 3% para retirada de impurezas. Procedeu-se à montagem das colunas, aplicando-se uma camada de silicone nas conexões para fixação da estrutura. Na face interior de cada coluna, ainda foi feita aplicação de parafina, visando evitar o fluxo preferencial da água de percolação pelas paredes da coluna durante a lixiviação.



**Figura 2.** (A) Colunas de PVC utilizadas como unidades experimentais apoiadas em estrutura montada para deixá-las na posição vertical. (B) Detalhe da adaptação acoplada à base das colunas de solo para coleta do líquido percolado.

O solo e biossólido utilizados foram peneirados em peneira de malha de 2 mm e o volume colocado em cada coluna foi padronizado através do peso seco, para que se obtivesse a mesma quantidade de material em todos os tratamentos. Após acomodado o solo nas colunas (onde foi feita uma leve compactação quilo a quilo para evitar a diferença de acomodação do substrato entre os tratamentos), foi colocado um sombrite na superfície, de forma a diminuir o impacto da água quando da sua aplicação no momento da simulação de precipitação.

Os solos utilizados para o preenchimento das colunas foram amostrados no campo nas camadas de 0 a 25 cm e 25 a 50 cm de profundidade. Assim, os primeiros 25 cm da altura da coluna foram preenchidos com o solo coletado na camada de 25 a 50 cm de profundidade. Subsequentemente, o restante da coluna foi preenchido com o solo da camada de 0 a 25 cm, previamente misturado ao biossólido ou fertilizantes minerais, conforme especificado em cada tratamento (Tabela 6). O biossólido foi misturado na camada de solo superior (0 a 25 cm) da coluna simulando a aplicação em uma cova de plantio de aproximadamente 8 L, o que seria equivalente, por exemplo, a uma cova com dimensões aproximadas de 0,20 m de diâmetro e 0,25 m de altura. Logo, as quantidades aplicadas nas colunas de 0,5, 1,0 e 2,0 L foram equivalentes a uma aplicação de 2, 4 e 8 L de biossólido/cova, respectivamente (Tabela 6).

A tabela 6 mostra ainda uma simulação da quantidade equivalente de biossólido que seria aplicada em um hectare, considerando um plantio florestal com densidade de 1250 plantas ha<sup>-1</sup> (ex., plantio com espaçamento 4 m x 2 m). Com base nessas premissas, as quantidades de biossólido aplicadas nas colunas seriam equivalentes à aplicação de 2,5, 5 e 10 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> de biossólido.

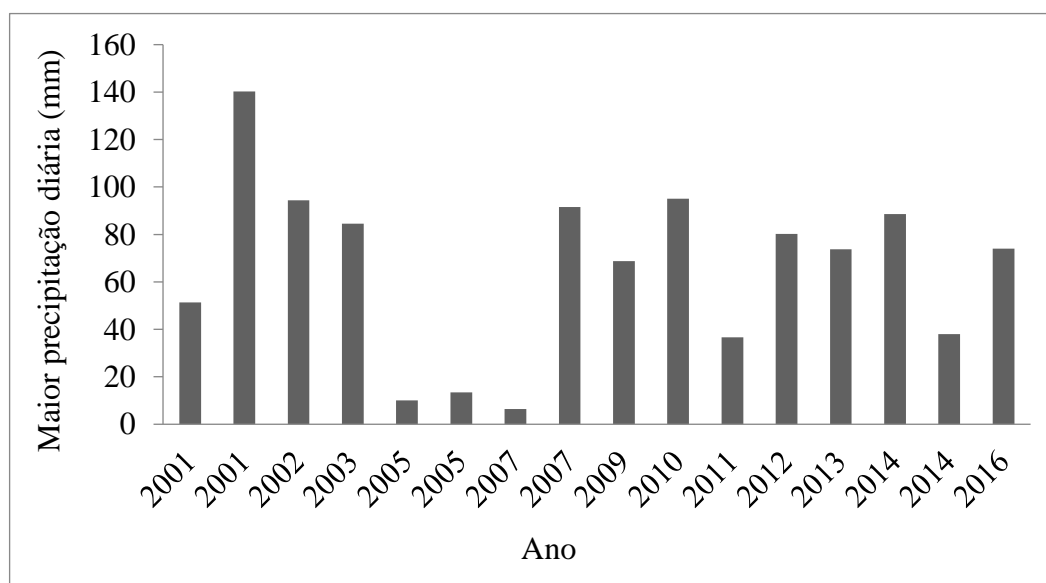
**Tabela 6.** Volume de biossólido aplicado na camada de 0-25 cm das colunas de lixiviação, volume equivalente por cova de plantio de 8 L, percentual da cova ocupado por biossólido e dose equivalente de biossólido por hectare considerando 1250 covas/ha.

Dose de biossólido na coluna (L/coluna)	Volume equivalente de biossólido por cova (L/cova)	Percentual da cova ocupado por biossólido (%)	Dose equivalente de biossólido por hectare (m <sup>3</sup> /ha)
0,50	2	25	2,5
1,00	4	50	5,0
2,00	8	100	10,0

Todas as colunas foram pesadas antes e após o preenchimento, obtendo-se assim o peso seco (peso inicial) de cada tratamento. Após a montagem, as colunas foram levadas para casa de vegetação onde foram fixadas em posição vertical em uma estrutura metálica para facilitar a coleta do material percolado (Figura 2), e então mantida incubada por aproximadamente 60 dias antes do início do período de lixiviação.

#### 4.2 Simulação de chuva e coleta do lixiviado das colunas

Após a montagem, cada coluna foi saturada imergindo-a em um recipiente contendo água deionizada pelo período necessário para observar a formação de um espelho d'água na superfície do solo (ponto de saturação). As colunas foram então imediatamente retiradas do recipiente e drenadas livremente por 24 horas, tempo necessário para a drenagem gravitacional da água retida em macroporos (umidade de capacidade de campo). Após esse período, procedeu-se o ensaio de lixiviação que consistiu na aplicação de uma lâmina de 140 mm de água deionizada por coluna. Essa lâmina d'água foi definida com base no volume de chuva equivalente à maior precipitação diária para o município de Seropédica durante o período de maio de 2000 a maio de 2016, segundo INMET (2016) (Figura 3). Considerando a área da coluna, 140 mm são equivalentes a 1,2 L. Assim, foram aplicadas frações de 200 ml em intervalos de 2 horas durante 12 horas, o que ocasionou uma aplicação total de 1,2 L.



**Figura 3.** Maior precipitação diária, por ano, de maio de 2001 a maio de 2016. Fonte: INMET, 2016.

Após 24 horas da primeira aplicação de água, foram novamente aplicados 200 ml de água (equivalente a 23,3 mm) e assim sucessivamente, a cada 24 horas, por 44 dias. Nos primeiros 11 dias deste período foram coletadas amostras diariamente. Durante os 6 dias seguintes foram coletadas amostras a cada 3 dias. Nos 16 dias seguintes, a coleta foi realizada a cada 4 dias e nos últimos 10 dias foram feitas coletas a cada 5 dias. Após cada adição de água às colunas, o lixiviado foi coletado em frascos Erlenmeyers de 250 ml contendo um funil acoplado (Figura 4). O armazenamento dos frascos foi feito em tubos tipo Falcon de 50 ml à 20°C até a análise.



**Figura 4.** Coleta do material lixiviado em frascos Erlenmeyers com funil acoplado e disposto abaixo das colunas de lixiviação.

### 4.3 Análise química do lixiviado

As amostras de lixiviado foram analisadas quanto à condutividade elétrica, ânions (nitrato, fosfato e sulfato), metais (arsênio, bário, cádmio, chumbo, cobre, cromo, níquel, selênio e zinco), além de prata, boro, cobalto, ferro, manganês, alumínio, antimônio, vanádio, cálcio, potássio, magnésio e sódio. A condutividade elétrica foi aferida com o auxílio de medidor portátil YSI modelo 63 (YSI Incorporated, Yellow Springs, Ohio, USA).

As análises de ânions e metais foram realizadas pelo Laboratório de Gerência de Controle de Qualidade de Água – GCQ da Nova CEDAE. As concentrações de ânions foram determinadas via cromatografia iônica e as concentrações de metais via método ICP/OES. Os resultados de pH foram determinados pelo método potenciométrico.

### 4.4 Análise dos dados

Para avaliar a dinâmica de lixiviação de ânions e metais foram construídas curvas relacionando a concentração do elemento em cada evento de lixiviação. Foram também construídas curvas do acumulado lixiviado de cada elemento em função da lâmina d'água aplicada na coluna. Os dados do total lixiviado de cada elemento foram analisados por análise de variância, seguido pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ) para comparar as médias dos tratamentos.

#### 4.4.1 Carga máxima de aplicação de biossólido

A carga máxima de aplicação do biossólido usado nesse estudo foi obtida tomando-se como base os valores máximos especificados na Resolução nº 375 do CONAMA, a qual



estabelece a carga acumulada teórica permitida de substâncias inorgânicas pela aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado. Para obter a carga máxima de bio sólido específica de cada metal foi utilizada a equação abaixo:

$$CMB_i \text{ (Mg/ha)} = CAT_i \times 10^3 / CB_i$$

onde,  $CMB_i$  é a carga máxima de bio sólido para o metal  $i$  em Mg/ha;  $CAT_i$  é a carga acumulada teórica para o metal  $i$  definida na legislação, e  $CB_i$  é a concentração do metal  $i$  no bio sólido utilizado no estudo. A carga máxima de aplicação do bio sólido foi então definida como o menor valor de CBM calculado dentre todos os metais. Desse modo, a CBM fica limitada ao elemento com concentração no bio sólido mais próxima do limite permitido.

#### 4.4.2 Análise de risco de contaminação de águas subterrâneas

A avaliação do risco de contaminação de águas subterrâneas pela aplicação do bio sólido foi feita com base nos limites de metais em águas subterrâneas estabelecidos na Resolução CONAMA nº 420/2009. Primeiramente, o conteúdo total de metais lixiviados nas colunas que receberam a maior carga de lodo (2 L) foram convertidos para conteúdo lixiviado em 1 ha (mg/ha). Para isso, considerou-se a aplicação de 8 L de bio sólido por cova de 20 cm de diâmetro e 25 cm de profundidade (0,0079 m<sup>2</sup> de área de projeção) e densidade de plantio de 1250 plantas/ha. Essa simulação é equivalente, portanto, à aplicação de uma carga de 10 m<sup>3</sup> de bio sólido por ha concentrados em uma área de projeção total de 39,3 m<sup>2</sup>/ha, referente às 1250 covas. A quantidade lixiviada foi então obtida pela equação abaixo:

$$QL_i \text{ (mg/ha)} = APC \times QC \times QLC_i / ACol$$

onde,  $QL_i$  é a quantidade lixiviada do metal  $i$  por ha; APC é a área de projeção de uma cova de 20 cm de diâmetro (m<sup>2</sup>); QC é a quantidade de covas em 1 ha;  $QLC_i$  é a quantidade total do metal  $i$  lixiviado na coluna, e ACol é a área de projeção da coluna de lixiviação (m<sup>2</sup>).

Em seguida, foi convencionado que 80% da carga de metal lixiviável em uma lâmina d'água de 1200 mm (valor equivalente a 1 ano de precipitação no local do estudo) é lixiviada em uma lâmina d'água percolada de 140 mm, equivalente a um volume de 1,4 milhão de litros por ha. Finalmente, a concentração de cada metal no volume percolado foi obtido pela divisão entre o conteúdo de metal lixiviado em 1 ha e o volume de água percolada. A equação abaixo descreve esse cálculo:

$$CMAS_i \text{ (}\mu\text{g/L)} = (QL_i \times 1000) / VAP$$

onde, CMAS é a concentração do metal  $i$  esperada na água subterrânea (μg/L);  $QL_i$  é a quantidade do metal  $i$  lixiviado em 1 ha (mg/ha), e VAP é o volume de água (L/ha) percolado, estabelecido nesse estudo, como equivalente a uma lâmina d'água de 140 mm ou 1,4 milhões de litros por ha. A avaliação de risco foi então realizada comparando-se a CMAS de cada metal com o respectivo limite estabelecidos na Resolução CONAMA nº 420/2009.

Salienta-se que a estimativa da CMAS realizada ignora a presença prévia de água subterrânea, ou seja, desconsidera uma possível diluição da solução percolada. Ademais, a lâmina d'água de 140 mm foi suficiente para lixiviar até 100% de alguns metais como Cd e Cr, mas não para todos os metais analisados. Entretanto, entende-se que essas duas premissas conservadoras aumentam o rigor da análise.

#### 4.4.3 Análise de risco de eutrofização de águas superficiais

A avaliação do risco de eutrofização de águas superficiais foi avaliada tendo como base os valores de fósforo total indicados na tabela de classificação do estado trófico de rios e reservatórios segundo o Índice de Carlson Modificado (CETESB, 2007). O teor de P na água, segundo essa classificação, constitui uma medida do potencial de eutrofização, já que este nutriente atua como o agente causador do processo. A simulação realizada teve os mesmos

pressupostos da avaliação de risco de contaminação de águas subterrâneas: (1) aplicação de 10 m<sup>3</sup>/ha de biossólido em 1250 covas de 0,2 m de diâmetro por 0,25 m de profundidade; (2) lixiviação de 80% da carga do íon PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> em lâmina d'água de 140 mm ou 1,4 milhões de litros por ha.

A concentração de fosfato total no volume percolado foi obtida pela razão entre o conteúdo de íon lixiviado em 1 ha e o volume de água percolada, conforme a equação abaixo:

$$\text{CPAS } (\mu\text{g/Lmg/m}^3) = (\text{QP} \times 1000) / \text{VAP}$$

onde, CPAS é a concentração de fosfato esperada na água subterrânea (μg/L); QP é a quantidade de fosfato lixiviado em 1 ha (mg/ha), e VAP é o volume de água percolado (L/ha), estabelecido nesse estudo, como equivalente a uma lâmina d'água de 140 mm ou 1,4 milhões de litros por ha. A avaliação de risco foi então realizada comparando-se a CPAS calculada com a tabela de classificação do estado trófico de rios e reservatórios segundo o Índice de Carlson Modificado (CETESB, 2007).

#### **4.4.4 Análise de risco de contaminação do solo**

O risco de contaminação do solo com metais pesados foi avaliado tendo como referência o valor de investigação para metais permitidos em solo agrícola, conforme a Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 420/2009. Para isso, foi considerada a concentração de metais acumulados no solo (mg/kg) como sendo a diferença entre o adicionado via biossólido e o total lixiviado pela aplicação de 1200 mm de lâmina d'água, maior precipitação para o município de Seropédica. O valor obtido correspondeu à concentração de metal acumulado no solo sendo expresso em concentração na cova de plantio e por ha. A concentração de metal por ha foi obtida pela razão entre o conteúdo total de metal acumulado em 1 ha (aplicação de 10 m<sup>3</sup> de biossólido) e a massa de solo da camada arável, ou seja, 2 x 10<sup>6</sup> kg de solo (0 a 20 cm, densidade aparente de 1 g/dm<sup>-3</sup>), conforme equação abaixo:

$$\text{CMS}_i \text{ (mg/kg)} = (\text{QB}_i - \text{QL}_i) / 2 \times 10^6$$

onde, CMS é a concentração do metal *i* esperado no solo em mg/kg; QB<sub>*i*</sub> é a quantidade do metal *i* em 10 m<sup>3</sup> de biossólido; QL<sub>*i*</sub> é a quantidade do metal *i* lixiviado em 1 ha em mg/ha, e 2 x 10<sup>6</sup> é a massa de solo da camada arável em 1 ha (kg/ha). A avaliação de risco foi então realizada comparando-se a CMS<sub>*i*</sub> de cada metal com o respectivo limite estabelecido na Resolução CONAMA n<sup>o</sup> 420/2009.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Potencial agronômico do biossólido e teores de metais pesados no solo, fertilizante mineral e biossólido

Os resultados obtidos do biossólido de lodo de esgoto proveniente da ETE Ilha do Governador são apresentados na tabela 7. Além do alto teor de carbono orgânico, destacam-se os altos teores de macronutrientes presentes no biossólido.

**Tabela 7.** Potencial agronômico do biossólido de lodo de esgoto obtido na ETE Ilha do Governador do município do Rio de Janeiro, conforme Resolução CONAMA 375/06.

Determinação	Método	Unidade	Resultado
Carbono Orgânico	(b)	g/kg	91,7
Fósforo	(c)	g/kg	4,02
Potássio	(d)	g/kg	3,4
Sódio	(a)	mg/kg	824
Enxofre	(a)	g/kg	9,4
Cálcio	(e)	g/kg	14,4
Magnésio	(e)	g/kg	4,6
Nitrogênio Kjeldahl	(b)	g/kg	9,3
Nitrogênio amoniacal	(b)	mg/kg	16,3
Nitrogênio nitrato-nitrito	(b)	mg/kg	629
Sólidos Voláteis	(b)	%m/m	23,9
Sólidos Totais	(b)	%m/m	77,6
Umidade, a 60 – 65°C	(b)	%m/m	22,4
pH (em água 1:10)	(b)	-	4,3

(a) Metais: EPA-SW-846-3051, com determinação por ICP-AES, de acordo com EPA-SW-846-6010.

(b) Nitrogênio total: método Kjeldahl; Nitrogênio amoniacal, nitrato e nitrito: destilação por arraste a vapor; Carbono orgânico: digestão com dicromato e determinação volumétrica, Umidade e sólidos voláteis: perda de massa a 60 e 500°C, respectivamente; pH: determinação em extrato aquoso na proporção 1:10 (resíduo:água) (ANDRADE E ABREU, 2006).

(c) P: colorimetria.

(d) K: fotometria de chama.

(e) Ca e Mg: absorção atômica.

A tabela 8 apresenta comparativamente os teores de alguns metais pesados presentes no Planossolo e Latossolo, na amostra de fertilizante mineral e biossólido utilizados na montagem das colunas, além dos valores máximos permitidos para essas substâncias pela Resolução CONAMA 375/06 no biossólido. Para a análise dos fertilizantes minerais, esses foram homogeneizados conforme proporções calculadas de acordo com o fornecimento de macronutrientes na dose de 1 L de biossólido. Verificou-se para arsênio, cádmio, chumbo, cromo e níquel, que os resultados obtidos para o fertilizante mineral superaram os encontrados no biossólido, enquanto para mercúrio e selênio os resultados se igualaram, não sendo detectados pelo método analítico utilizado.

**Tabela 8.** Teores de alguns metais pesados presentes no Planossolo, no Latossolo, na mistura de fertilizantes minerais e no biossólido. Os valores de metais admitidos no biossólido pela Resolução CONAMA 375/06 também são apresentados como referência.

Determinação/método ----- mg.kg <sup>-1</sup> -----	Conama 375/2006	Biossólido (b)	Fertilizante mineral (a)	Planossolo 0-25 cm (a)	Latossolo 0-25 cm (a)
As	41	<1,0*	15,1	<1,0*	<1,0*
Cd	39	1,4	40,0	<0,4*	<0,4*
Pb	300	58,4	383	<3,0*	3,4
Cr	1000	21,9	66,1	0,60	7,4
Hg	17	<1,0*	<1,0*	<1,0*	<1,0*
Ni	420	12,7	22,0	<2,4*	<2,4*
Se	100	<1,0*	<1,0*	<1,0*	<1,0*

(a) Metais: EPA-SW-846-3051, determinado por ICP-AES, de acordo com EPA-SW-846-6010.

(b) EPA-SW-846-3051, com determinação por ICP-AES.

\* Abaixo do limite de quantificação indicado.

Verificou-se que todos os resultados para metais pesados no biossólido utilizado nesse estudo encontram-se abaixo dos limites previstos na Resolução CONAMA n° 375/2006, conforme pode ser verificado na tabela 9.

**Tabela 9.** Teores de metais pesados no biossólido, carga acumulada teórica de metal por hectare e carga máxima teórica de biossólido por hectare definidos pela Resolução CONAMA 375/06 e para o biossólido produzido na ETE Ilha do Governador (ETE-IG).

Metal	Teor de metal no biossólido (mg/kg)		Carga acumulada teórica de metal pela aplicação do lodo de biossólido (kg/ha)		Carga máxima teórica de biossólido para alcançar o nível crítico (t/ha)	
	CONAMA 375/06	Biossólido ETE-IG	CONAMA 375/06	Biossólido ETE-IG*	CONAMA 375/06**	Biossólido ETE-IG
As	41	<1	30	0,007	732	30.000
Ba	1.300	137	265	0,959	204	1.934
Cd	39	1,4	4	0,010	103	2.857
Pb	300	58,4	41	0,409	137	702
Cu	1.500	162	137	1,134	91	846
Cr	1.000	21,9	154	0,153	154	7.032
Hg	17	<1	1,2	0,007	71	1.200
Mo	50	1,6	13	0,011	260	8.125
Ni	420	12,7	74	0,089	176	5.827
Se	100	<1	13	0,007	130	13.000
Zn	2.800	531	445	3,717	159	838

\* Carga acumulada pela aplicação teórica de 10 m<sup>3</sup>/ha (7 t/ha) de biossólido;

\*\* Estimativa baseada na carga acumulada teórica de metais pela aplicação de lodo definida na Resolução CONAMA 375/06.

Os resultados apresentados na tabela 10 simulam a concentração de metal acumulado na cova de plantio pela aplicação de 8 L de biossólido (obtido subtraindo-se a concentração de cada metal contido no biossólido da ETE IG, do total lixiviado por coluna de cada metal no tratamento com 8 L de biossólido) e a concentração de metal no solo na camada arável, caso 10 m<sup>3</sup>/ha de biossólido seja aplicado em área total e incorporado a 20 cm de profundidade (obtido subtraindo-se o total de cada metal adicionado pelo biossólido da ETE IG/ha do total lixiviado por coluna considerando aplicação de 8 L ou 10m<sup>3</sup>/ha, dividido pela quantidade total de solo contido na camada arável, até 20 cm, em 1 hectare).

Os conteúdos totais lixiviados de arsênio, bário, boro, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, ferro, manganês, níquel, nitrato, prata, selênio, zinco, fosfato, antimônio, alumínio e vanádio nas amostras de lixiviado, considerando a maior aplicação de biossólido (2 L na coluna ou 8 L em cova de plantio, equivalente a 10 m<sup>3</sup>/ha) por coluna estão descritos na tabela 11.

**Tabela 10.** Valores de prevenção e investigação para metais no solo agrícola estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, concentração de metal acumulado na cova de plantio após aplicação de 8 L de bio sólido, e concentração de metal acumulado no solo considerando a aplicação de 10 m<sup>3</sup>/ha do bio sólido da ETE IG em área total ou incorporados na camada arável (0 a 20 cm).

Metal	**VP para metais no solo (mg/kg)	*VI para metais no solo agrícola (mg/kg)	Bio sólido ETE (mg/kg)	Lixiviado na coluna no tratamento 2 L de bio sólido (mg)		Concentração de metal acumulado na cova de plantio (mg/kg)		Bio sólido ETE aplicado em 10 m <sup>3</sup> /ha ou 7 t/ha (mg/ha)	Lixiviado considerando aplicação de bio sólido de 10 m <sup>3</sup> /ha (mg/ha)		Concentração de metal acumulado no solo para 10 m <sup>3</sup> /ha de bio sólido (mg/kg)		Percentual de lixiviação do total de metal contido no bio sólido	
				Planossolo	Latossolo	Planossolo	Latossolo		Planossolo	Latossolo	Planossolo	Latossolo	Planossolo	Latossolo
Al	-	-	9623	0,1	3,7	9.622	9.619	67.361.000	465	18.247	33	33	0%	0%
Sb	2	5	-	0,01	0,0	-	-	-	36	16	-	-	-	-
As	15	35	1	0,0	0,0	1	1	7.000	0	0	0,004	0,004	0%	0%
Ba	150	300	137	2,5	1,2	134	135	959.000	12.719	6.054	0,47	0,47	1,3%	0,6%
B	-	-	3,2	2,6	2,7	0,59	0,54	22.400	13.021	13.289	0,005	0,005	58,1%	59,3%
Cd	1,3	3	1,4	0,0	0,01	1,39	1,39	9.800	2	30	0,005	0,005	0%	0,3%
Pb	72	180	58,4	0,0	0,0	58	58	408.800	0	0	0,20	0,20	0%	0%
Co	25	35	-	0,4	0,05	-	-	-	1.909	253	-	-	-	-
Cu	60	200	162	0,1	0,09	161	161	1.134.000	580	433	0,57	0,56	0,1%	0%
Cr	75	150	21,9	0,01	0,0	21	21	153.300	53	2	0,08	0,08	0%	0%
Fe	-	-	19.255	2,6	5,6	19.252	19.249	134.785.000	12.737	27.800	67	67	0%	0%
Mn	-	-	327	72	25	254	301	2.289.000	362.480	127.998	0,96	1,08	15,8%	5,6%
Hg	0,5	12	1	-	-	-	-	7.000	0	0	-	-	0%	0%
Mo	30	50	1,6	-	-	-	-	11.200	0	0	-	-	0%	0%
Ni	30	70	12,7	0,02	0,2	12,6	12,5	88.900	80	929	0,04	0,04	0,1%	1%
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-	-	-	2.148	2.294	-	-	-	10.741.019	11.472.421	-	-	-	-
Ag	2	25	-	0,03	0,01	-	-	-	134	73	-	-	-	-
Se	5	-	1	0,2	0,2	0,84	0,84	7.000	784	789	0,003	0,003	11,2%	11,3%
V	-	-	-	0,0	0,0	-	-	-	0	0	-	-	-	-
Zn	300	450	531	3,6	20	527	510	3.717.000	17.775	100.047	1,85	1,81	0,5%	2,7%

\*Valor de investigação segundo a Resolução CONAMA 420/2009. \*\*Valor de prevenção segundo a Resolução CONAMA 420/2009.

**Tabela 11.** Limite de metais em águas subterrâneas estabelecidos pela Resolução CONAMA 420/2009, quantidade de metal lixiviado estimado pela aplicação de 10 m<sup>3</sup>/ha de biossólido, percentual de metal lixiviado em relação ao adicionado via biossólido e concentração de metal estimada na água subterrânea após percolação de 140 mm.

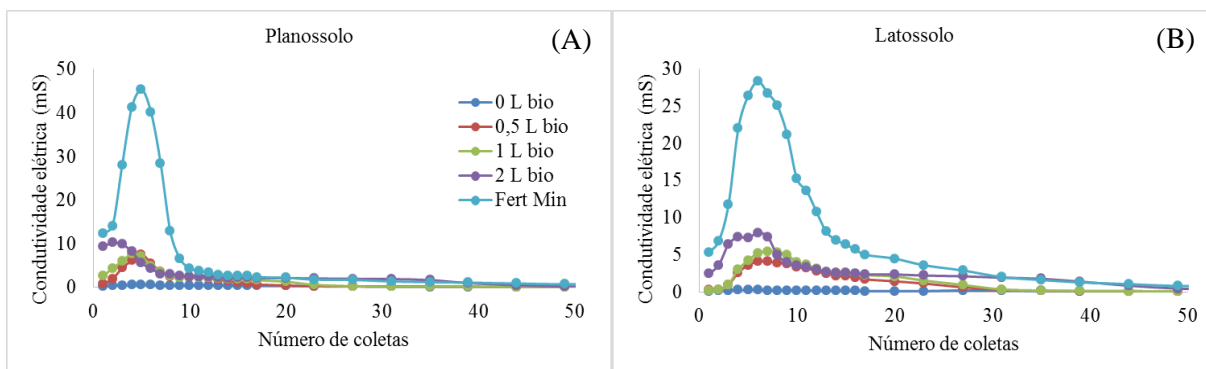
Metal	*Valor de intervenção em água subterrânea (µg/L)	Concentração de metal na água subterrânea após percolação de 140 mm (µg/L)	
		Planossolo	Latossolo
Al	3.500	0,33	13
Sb	5	0,03	0,01
As	10	0	0
Ba	700	9,1	4
B	500	9,3	9
Cd	5	0,001	0,02
Pb	10	0	0
Co	70	1,4	0,2
Cu	2.000	0,4	0,3
Cr	50	0,04	0,001
Fe	2.450	9	20
Mn	400	259	91
Hg	1	-	-
Mo	70	-	-
Ni	20	0,06	0,7
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10.000	7.672	8.195
Ag	50	0,1	0,05
Se	10	0,6	0,6
V	-	0	0
Zn	1.050	13	72
**PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	-	176	19

\*Segundo a Resolução CONAMA 420/2009. \*\*Classificação do Estado Trófico segundo o Índice de Carlson (CETESB, 2007).

## 5.2 Condutividade elétrica do lixiviado

A condutividade elétrica (CE) do lixiviado aumentou nos tratamentos que receberam biossólido nas colunas ou aplicação de fertilizantes minerais em relação ao controle. O efeito mais proeminente, entretanto, ocorreu quando houve a aplicação de fertilizantes minerais, independentemente do tipo de solo (Figuras 5A e 5B). No Planossolo, o pico de CE no tratamento com aplicação de fertilizantes minerais foi de 45,4 mS/cm (milisiemens por centímetro) após a lixiviação de 116,5 mm de água, enquanto no tratamento controle foi de 0,57 mS/cm. Com aplicação de doses 0, 0,5, 1 e 2 L de biossólido, os picos de CE foram de 0,6, 7,6, 7,7 e 10,3 mS/cm, após lixiviação de 116,5 mm, 116,5 mm, 93,2 mm e 46,6 mm, respectivamente (Figura 5A). No Latossolo, os picos de CE foram menores que no Planossolo, atingindo no tratamento com fertilizantes minerais 28,4 mS/cm após a lixiviação de 139,8 mm, e no tratamento controle 0,31 mS/cm. A aplicação de doses 0, 0,5, 1 e 2 L de biossólido, os picos de CE foram de 0,31, 4,1, 5,5 e 8 mS/cm, após lixiviação de 140 mm para as doses de 0 e 2 L e de 163 mm para as doses de 0,5 e 1 L de biossólido por coluna (Figura 5B).

A condutividade elétrica do lixiviado retornou a níveis próximos do tratamento controle mais rapidamente no Planossolo do que no Latossolo, onde os íons parecem ter sido lixiviados mais gradativamente. Após cerca de 45 eventos de lixiviação (1.048,5 mm totais), a CE retornou a níveis similares ao do controle em ambos os solos.



**Figura 5.** Dinâmica da condutividade elétrica (mS) em amostras de lixiviado obtidas de colunas de 50 cm de altura preenchidas com um Planossolo de textura arenosa ou um Latossolo de textura argilosa, ambos condicionados com 0, 0,5, 1 ou 2 L de bio sólido ou com fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Em cada evento de lixiviação foram aplicados 23,3 mm de água por coluna.

### 5.3 Dinâmica de lixiviação de metais pesados

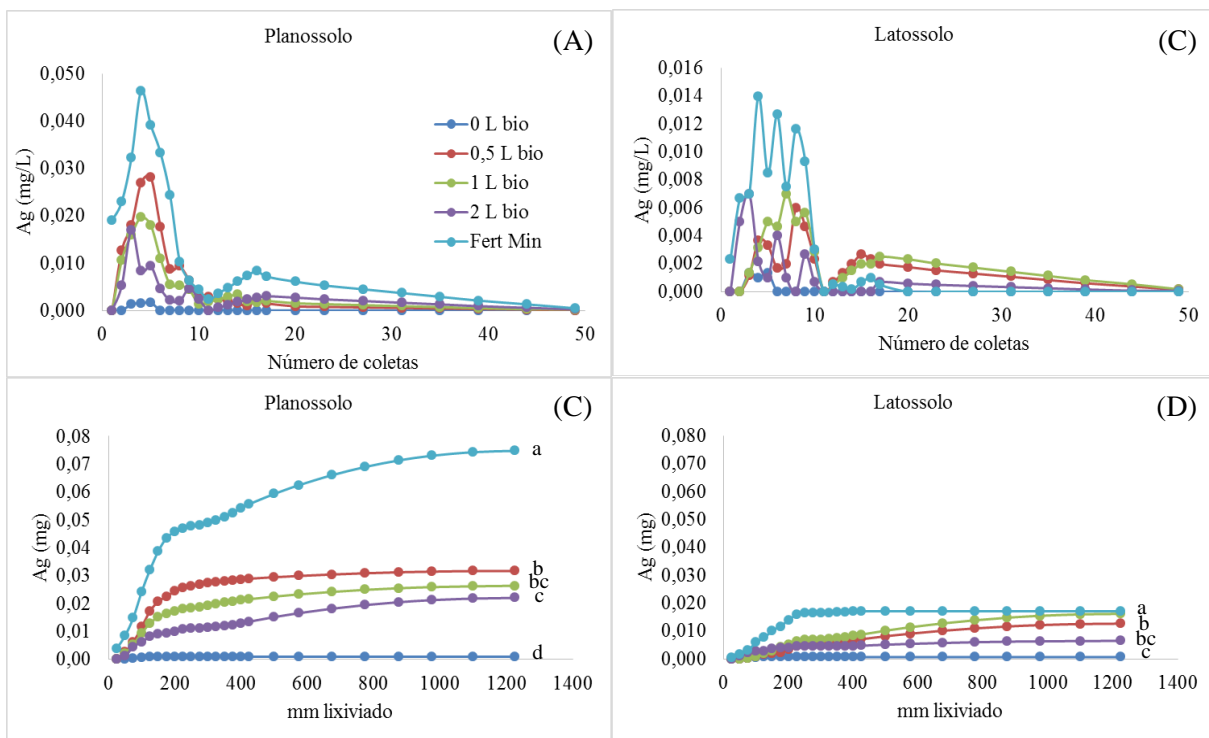
#### 5.3.1 Prata (Ag)

Foi possível verificar o elemento prata (Ag) em todos os lixiviados, com exceção do tratamento controle, em ambos os solos, sendo nas colunas que receberam fertilizante mineral detectadas as maiores concentrações. Para o Planossolo observou-se um pico de 0,05 mg/L após 93,2 mm lixiviados (Figura 6A), totalizando 0,07 mg/coluna acumulado de Ag após 1200 mm (Figura 6C). O tratamento com fertilizante mineral apresentou lixiviação superior aos demais, enquanto entre as doses de bio sólido não foi detectada diferença.

O tratamento com fertilizante mineral também foi responsável pela maior lixiviação de Ag no Latossolo, ocorrendo resultados máximos de 0,01 mg/L (Figura 6B), sendo acumulados 0,02 mg/coluna de Ag ao final do período de lixiviação (Figura 6D).

Não foi observada diferença entre o tratamento onde houve aplicação de 1 L de bio sólido e o tratamento com fertilizante mineral. Porém, houve estatística entre o tratamento com fertilizante mineral e as demais doses de bio sólido.



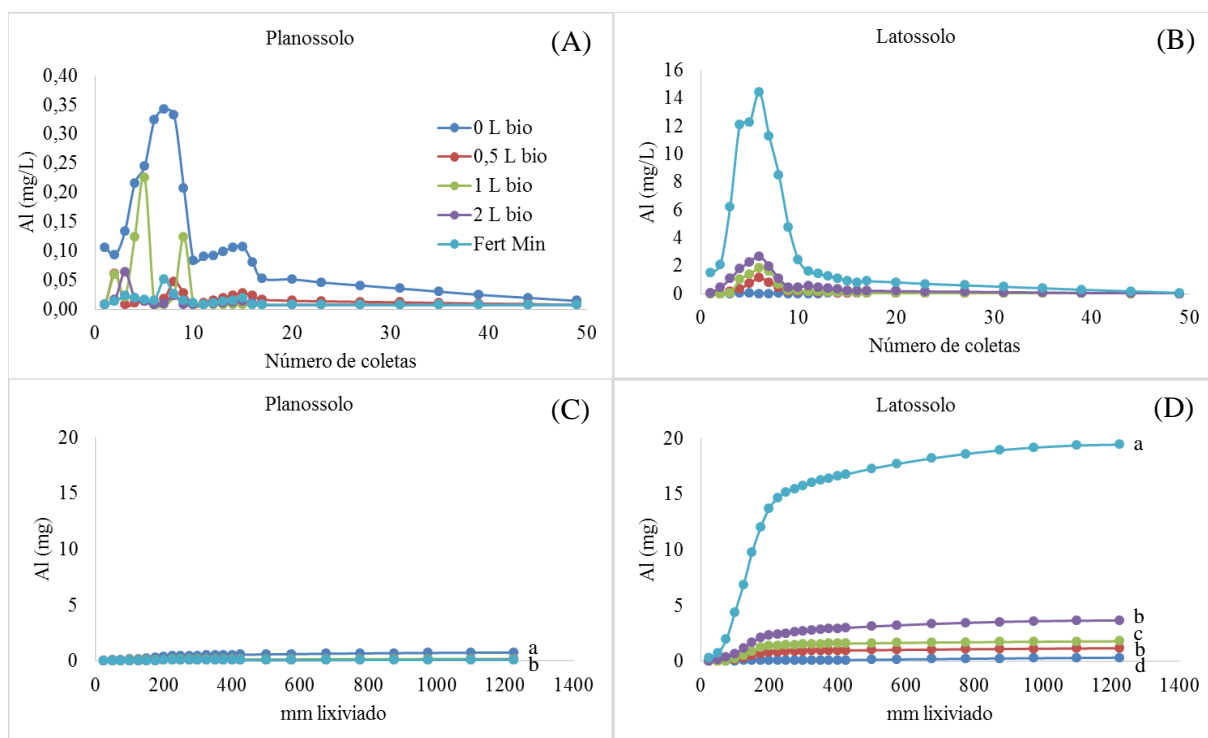


**Figura 6.** Dinâmica de lixiviação de prata (Ag) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de bio-sólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.2 Alumínio (Al)

Foi possível verificar alumínio (Al) em todos os lixiviados, em ambos os solos, sendo detectadas as maiores concentrações no tratamento controle no Planossolo (Figura 7A), e nas colunas que receberam fertilizante mineral no Latossolo (Figura 7B). Para o Planossolo obteve-se um pico de lixiviação de 0,34 mg/L após 163,1 mm lixiviados, totalizando um acúmulo de 0,74 mg (Figura 7C). Para o Latossolo observou-se um pico de 14,4 mg/L após 139,8 mm lixiviados, sendo acumulados 19,4 mg ao final do período de lixiviação (Figura 7D), sendo bastante superior ao controle.

As colunas que receberam bio-sólido em ambos os solos, foram responsáveis pela lixiviação de pequenas concentrações, com exceção do tratamento com 1 L de bio-sólido no Planossolo, que obteve pico de 0,22 mg/L (Figura 7A).

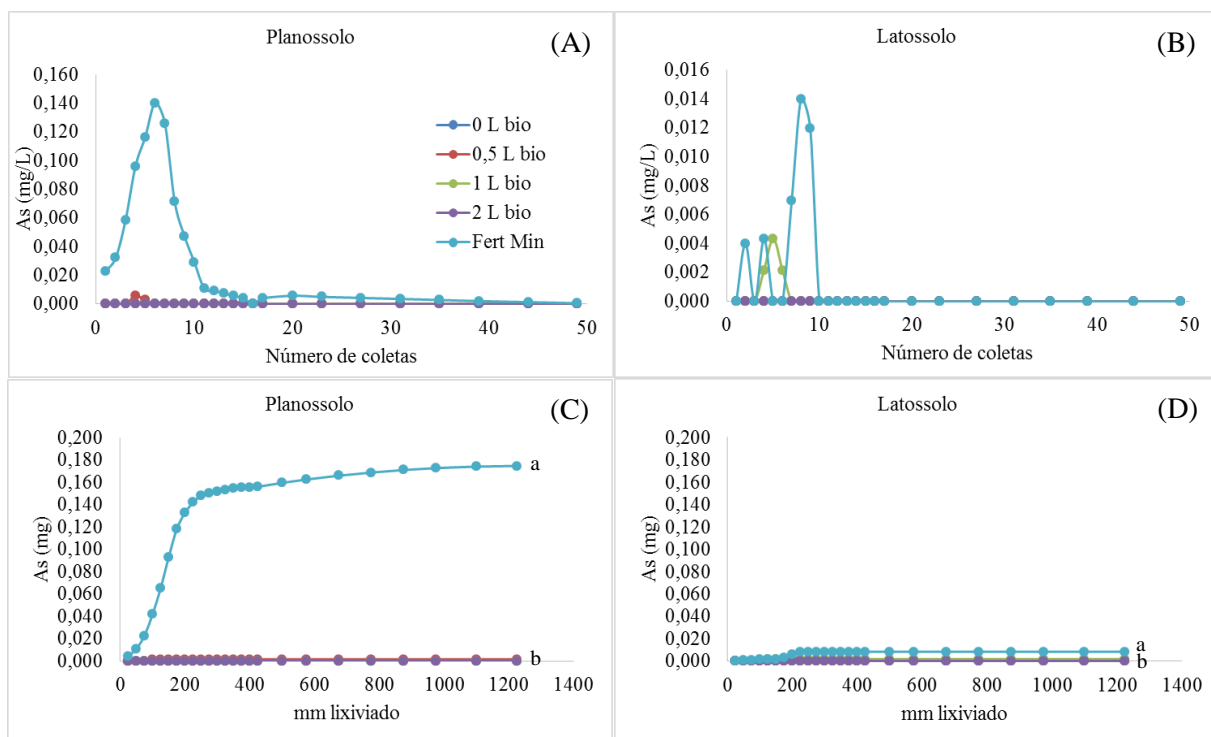


**Figura 7.** Dinâmica de lixiviação de alumínio (Al) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.3 Arsênio (As)

O elemento arsênio (As) foi detectado praticamente apenas no lixiviado de colunas que receberam fertilizante mineral. No entanto, a quantidade total lixiviada no Latossolo foi entornada de 10 vezes inferior ao Planossolo (Figura 8B). Para o Planossolo obteve-se um pico de 0,14 mg/L após 140 mm lixiviados (Figura 8A), com acúmulo total de 0,18 mg/coluna de As após a lixiviação dos 1200 mm (Figura 8C). Para o Latossolo observou-se um pico de 0,014 mg/L após 186 mm lixiviados (Figura 8B), sendo acumulados ao final da fase de lixiviação apenas 0,008 mg/coluna de As (Figura 8D).

Não foi detectado As no lixiviado das colunas que receberam biossólido em ambos os solos, à exceção de pequenas concentrações, próximas do limite de detecção da análise, no tratamento com 1 L de biossólido no Latossolo e com 0,5 L no Planossolo.



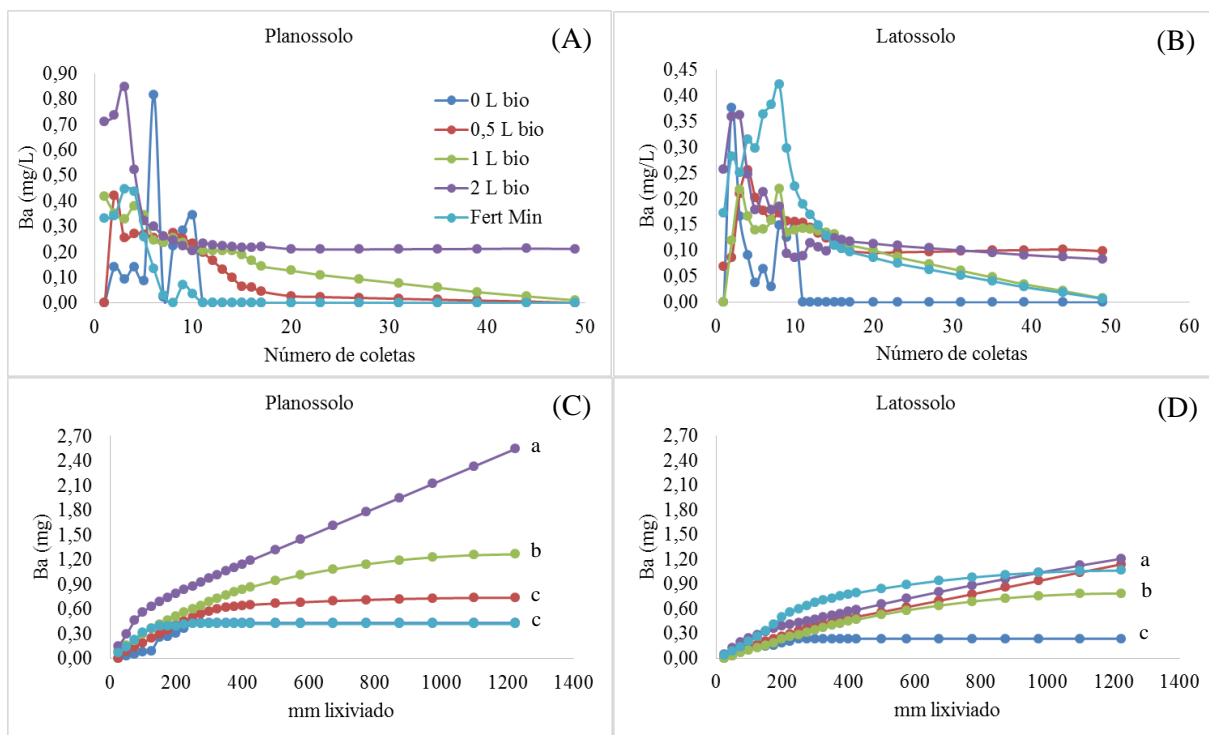
**Figura 8.** Dinâmica de lixiviação de arsênio (As) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.4 Bário (Ba)

O padrão de lixiviação de bário (Ba) se mostrou errático nos primeiros 10 eventos de lixiviação, com todos os tratamentos apresentando picos variando entre 0,42 e 0,85 mg/L no Planossolo (Figura 9A) e entre 0,22 a 0,42 mg/L Ba no Latossolo (Figura 9B), incluindo o tratamento controle. A partir do 11º evento de lixiviação não foi mais detectado Ba no lixiviado do tratamento controle. Para os demais tratamentos, as concentrações de Ba tenderam a uma estabilização ou declínio gradual até sua ausência no lixiviado.

A maior lixiviação acumulada de Ba foi verificada no Planossolo na dose 2 L de biossólido chegando a 2,54 mg/coluna ( $p < 0,05$ ), seguido da dose de 1L. Nas doses 0,5 e 1 L foram acumulados 0,74 e 1,26 mg/coluna, enquanto nas doses 0 L e fertilizante mineral obteve-se 0,42 mg/coluna (Figura 9C). No Planossolo, a lixiviação de Ba das colunas que receberam fertilizantes minerais não diferiu do tratamento controle e da dose de 0,5 L de biossólido.

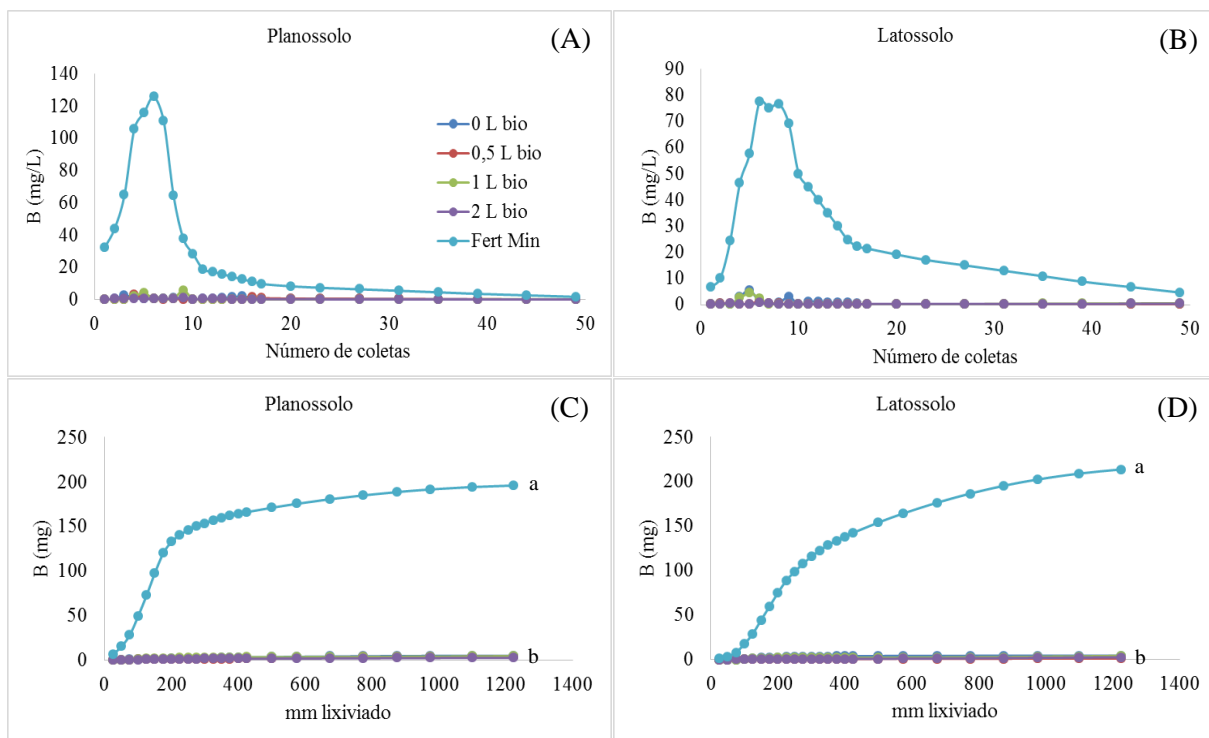
No Latossolo a lixiviação de Ba foi de duas a três vezes inferior à ocorrida no Planossolo (Figura 9B). Nesse solo, as maiores lixiviações acumuladas de Ba ocorreram nas doses 0,5 e 2 L de biossólido e no tratamento com fertilizante mineral (~1,15 mg Ba/coluna), seguidos da dose 1 L (0,79 mg Ba/coluna) (Figura 9D).



**Figura 9.** Dinâmica de lixiviação de bário (Ba) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.5 Boro (B)

Praticamente, somente foi detectado boro (B) no lixiviado do tratamento com fertilizante mineral em ambos os solos. Os picos observados foram de 125,7 e 77,5 mg/L aos 140 mm (Figuras 10A e 10B). O total lixiviado foi de 195,8 e 213,8 mg/coluna para o Planossolo (Figura 10C) e Latossolo (Figura 10D), respectivamente.

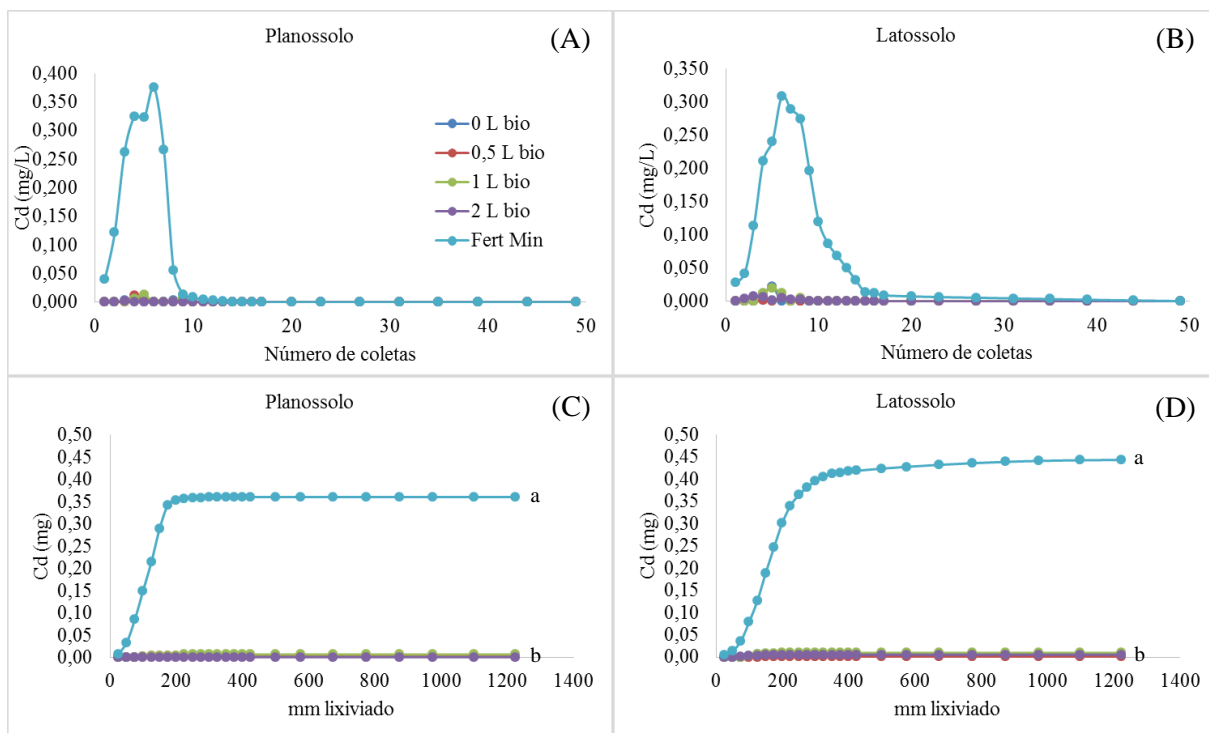


**Figura 10.** Dinâmica de lixiviação de boro (B) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de bio-sólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.6 Cádmi (Cd)

As maiores concentrações do elemento cádmio (Cd) no lixiviado foram encontradas nos tratamentos com fertilizante mineral em ambos os solos. As concentrações atingiram 0,38 mg/L e 0,31 mg/L no Planossolo (Figura 11A) e Latossolo (Figura 11B), respectivamente, após a aplicação de cerca de 140 mm de água nas colunas. O lixiviado dos tratamentos controle e com bio-sólido apresentaram concentrações muito inferiores de Cd que variaram de 0 a até 0,022 mg/L nos dois solos.

As maiores quantidades acumuladas de cádmio lixiviado ocorreram no tratamento com fertilizante mineral com totais de 0,36 mg/coluna e 0,44 mg/coluna no Planossolo (Figura 11C) e Latossolo (Figura 11D), respectivamente. Nos demais tratamentos, o acumulado ficou inferior a 0,01 mg/coluna.

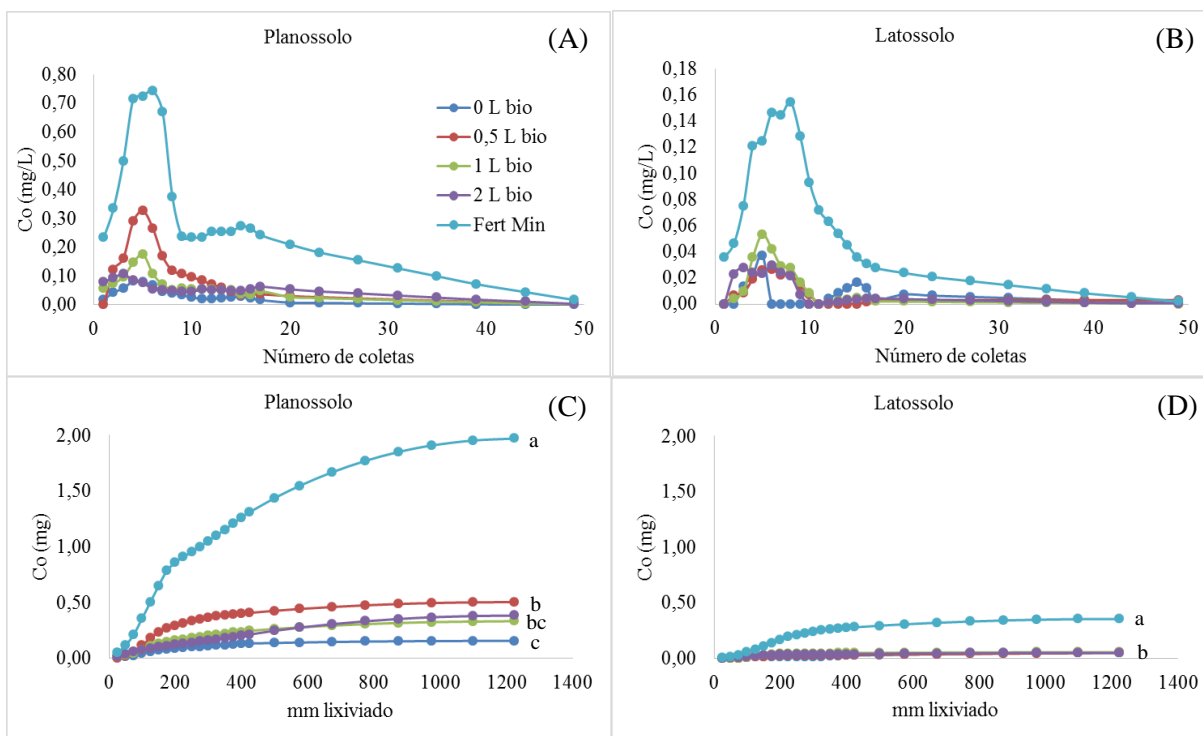


**Figura 11.** Dinâmica de lixiviação de cádmio (Cd) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.7 Cobalto (Co)

As maiores lixiviações de cobalto (Co) ocorreram no Planossolo, especialmente quando condicionado com fertilizante mineral (Figura 12A). Embora em patamar inferior, no Latossolo a maior lixiviação também ocorreu nas colunas que receberam fertilizante mineral (Figura 12B). Os picos de lixiviação de Co foram de 0,74 mg/L (aos 140 mm) e 0,15 mg/L (aos 116 mm) no Planossolo e Latossolo, respectivamente. O total lixiviado foi de 1,97 mg/coluna no Planossolo (Figura 12C) e de 0,36 mg/coluna no Latossolo (Figura 12D).

No Planossolo, a dose 0,5 L de biossólido obteve lixiviação acumulada de 0,50 mg/coluna de Co, valor superior ao controle (0,15 mg/coluna), mas estatisticamente similar às doses 1 e 2 L (Figura 12C). No Latossolo, as doses de biossólido e o controle não diferiram entre si, com lixiviação acumulada entorno de 0,05 mg Co/coluna (Figura 12D).

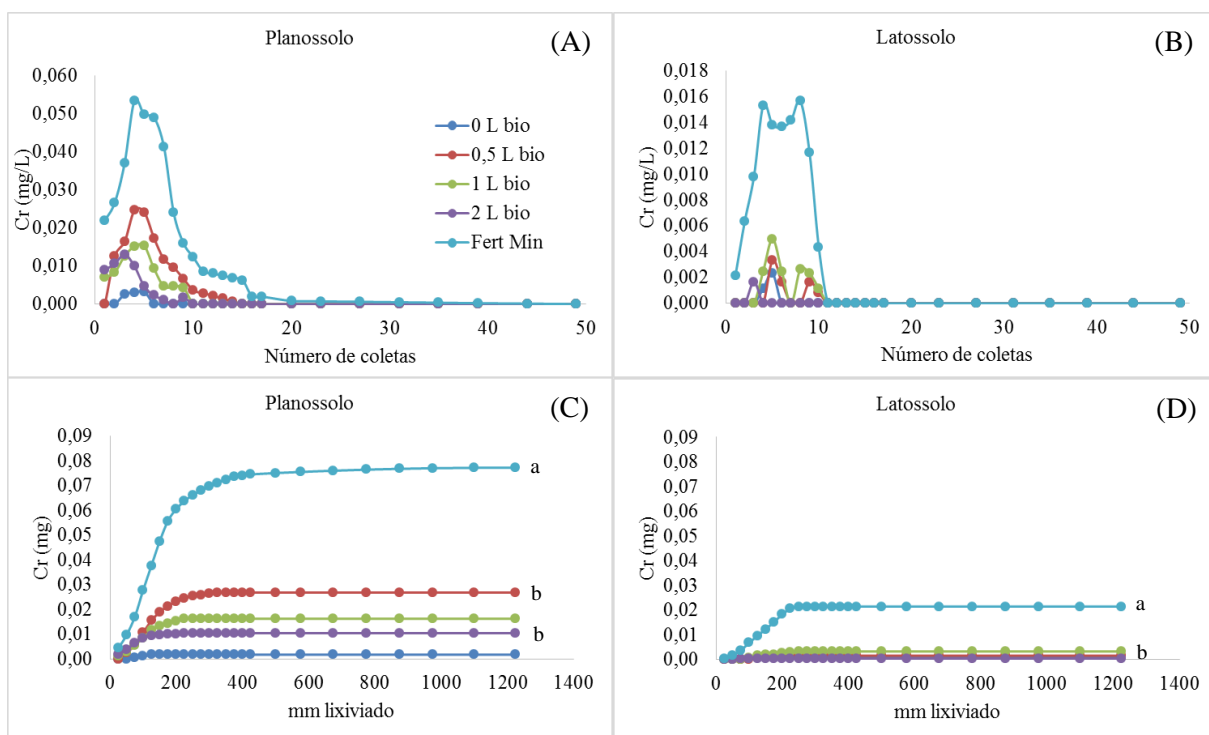


**Figura 12.** Dinâmica de lixiviação de cobalto (Co) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.8 Cromo (Cr)

A maior concentração de cromo (Cr) no lixiviado foi encontrada no tratamento com fertilizante mineral com picos de 0,053 mg/L e 0,016 mg/L no Planossolo e Latossolo, respectivamente, ambos após aplicação de cerca de 93 mm de água (Figuras 13A e 13B). Dentre os tratamentos com biossólido, as concentrações de Cr no lixiviado foram sempre inferiores a 0,025 mg/L no Planossolo e 0,005 mg/L no Latossolo. Após o 10º evento de lixiviação (230 mm) no Latossolo, não foi mais detectado Cr no lixiviado de nenhum tratamento (Figura 13B).

O Planossolo condicionado com fertilizante mineral apresentou o maior conteúdo total de Cr lixiviado atingindo 0,077 mg/coluna (Figura 13C), valor significativamente superior a todos os demais tratamentos ( $p < 0,05$ ). Dentre os demais tratamentos os valores acumulados variaram de 0,002 a 0,027 mg/coluna, entretanto, sem diferença estatística. No Latossolo, o lixiviado de Cr acumulado foi inferior no tratamento com fertilizante mineral, chegando a 0,021 mg/coluna, embora superando todos os demais tratamentos que não mostraram lixiviação superior a 0,003 mg/coluna (Figura 13D).



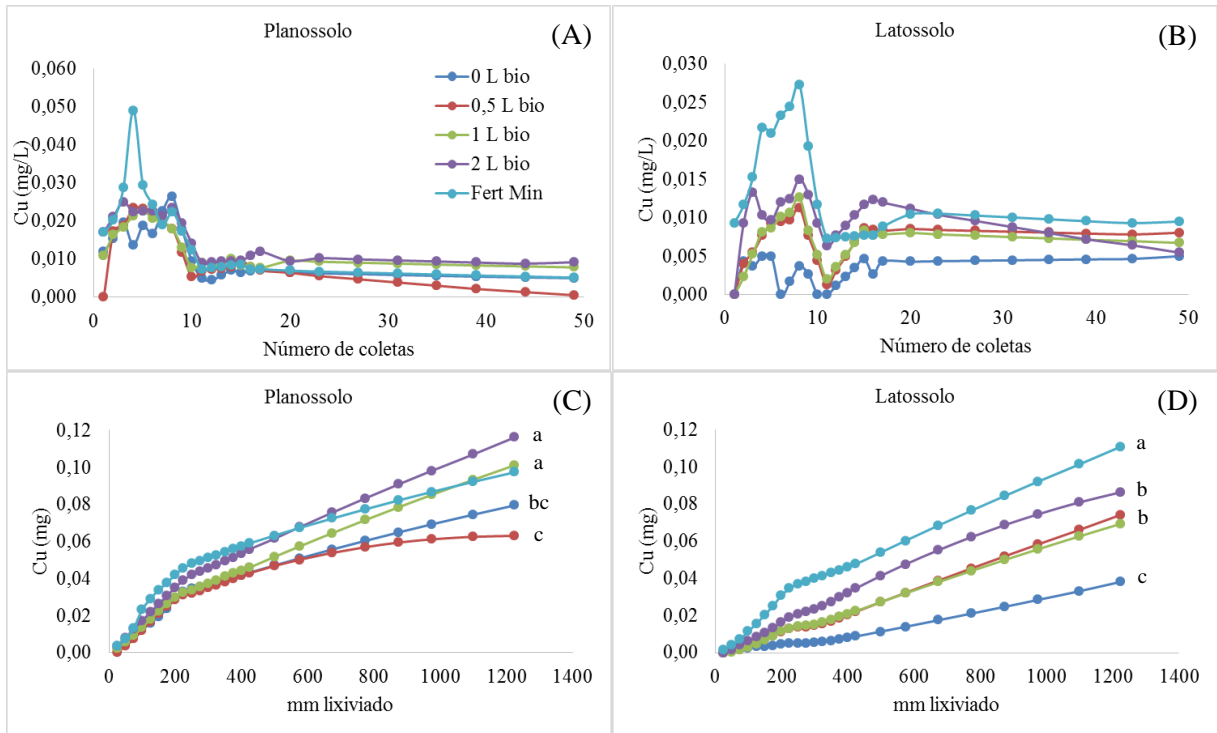
**Figura 13.** Dinâmica de lixiviação de cromo (Cr) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.9 Cobre (Cu)

Os maiores picos de cobre (Cu) no lixiviado ocorreram no tratamento com fertilizante mineral em ambos os solos. No Planossolo, a maior concentração observada foi de 0,05 mg/L aos 93 mm lixiviados e, no Latossolo, de 0,03 mg/L aos 186 mm (Figura 14A e 14B).

Ao final da lixiviação de 1200 mm, os maiores conteúdos de Cu lixiviado no Planossolo ocorreram nos tratamentos com fertilizante mineral e com aplicação de 1 e 2 L de biossólido (valores entre 0,092 a 0,116 mg Cu/coluna) (Figura 14C). Já no Latossolo, a maior lixiviação total ocorreu no tratamento com fertilizante mineral (0,111 mg Cu/coluna), sendo superior aos demais tratamentos. Nesse solo, os tratamentos com biossólido não diferiram entre si, mas lixiviaram quantidade de Cu superior ao controle (Figura 14D).



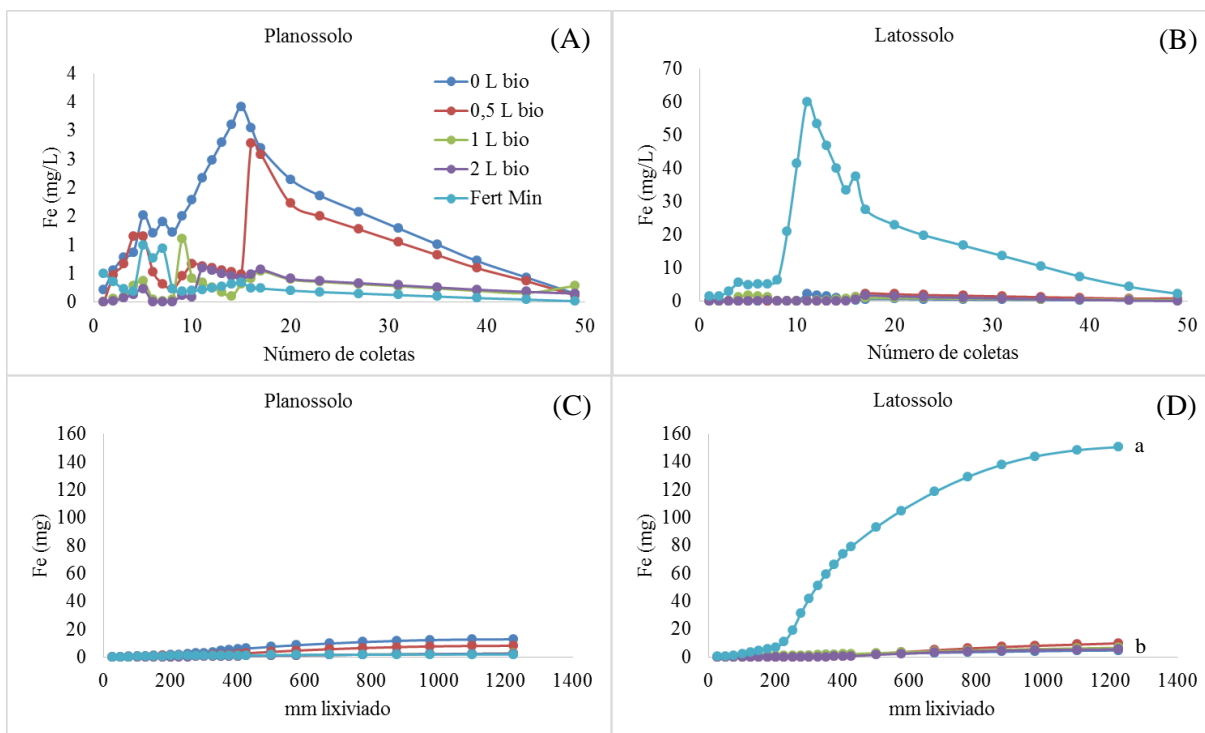


**Figura 14.** Dinâmica de lixiviação de cobre (Cu) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.10 Ferro (Fe)

A lixiviação de ferro (Fe) foi bastante diferenciada entre os dois tipos de solo quando foi adicionado fertilizante mineral. No Latossolo, a adição do fertilizante elevou substancialmente a lixiviação de Fe em relação aos demais tratamentos, levando a um pico de 60 mg/L aos 256 mm (Figura 15B) e lixiviado total de 151 mg/coluna (Figura 15D). Os demais tratamentos não diferiram entre si e obtiveram lixiviação acumulada inferior a 7 mg/coluna.

Diferentemente, o condicionamento do Planossolo com fertilizante mineral ou com biossólido não afetou a lixiviação de Fe, sendo todos esses tratamentos similares ao controle (Figura 15A). Desse modo, a lixiviação acumulada de Fe no Planossolo foi inferior a 12 mg/coluna para todos os tratamentos (Figura 15C).

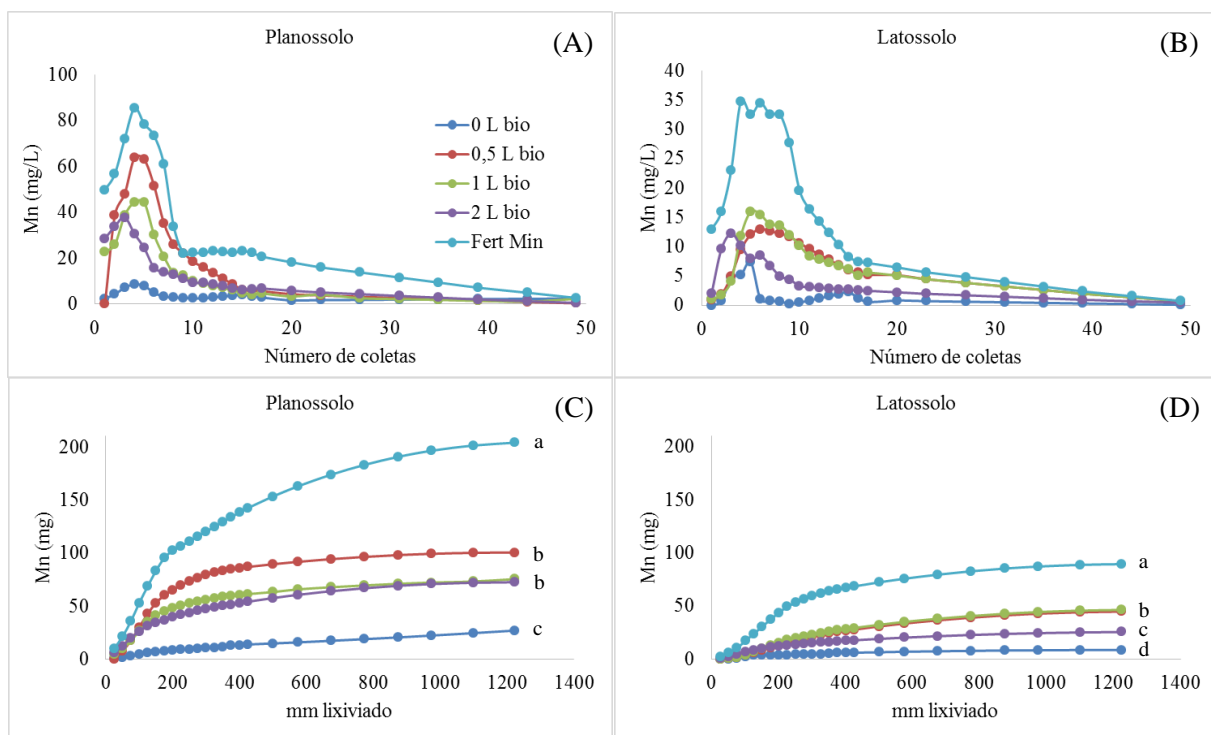


**Figura 15.** Dinâmica de lixiviação de ferro (Fe) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.11 Manganês (Mn)

Para ambos os solos o tratamento com fertilizante mineral proporcionou maior lixiviação de manganês (Mn), com 85,30 mg/L aos 93,2 mm (Figura 16A) e acúmulo de 203,90 mg/coluna (Figura 16C) para Planossolo, e 32,57 mg/L aos 163,1 mm (Figura 16B) e acúmulo de 89,5 mg/coluna (Figura 16D) para Latossolo ao final do período de lixiviação.

No Planossolo as doses 0,5, 1 e 2 L de biossólido proporcionaram lixiviação de 63,73, 44,43 e 37,80 mg/L aos 93,2, 93,2 e 69,9 mm (Figura 16A). Contudo, não houve diferença entre as doses (Figura 16C). No Latossolo as doses 0,5 e 1 L de biossólido não apresentaram diferença (Figura 16D) com 12,98 mg/L aos 139,8 mm e 15,95 mg/L aos 116,5 mm (Figura 16B). Na dose 2 L de biossólido a lixiviação de manganês se mostrou inferior com 12,27 mg/L aos 69,9 mm (Figura 16B).

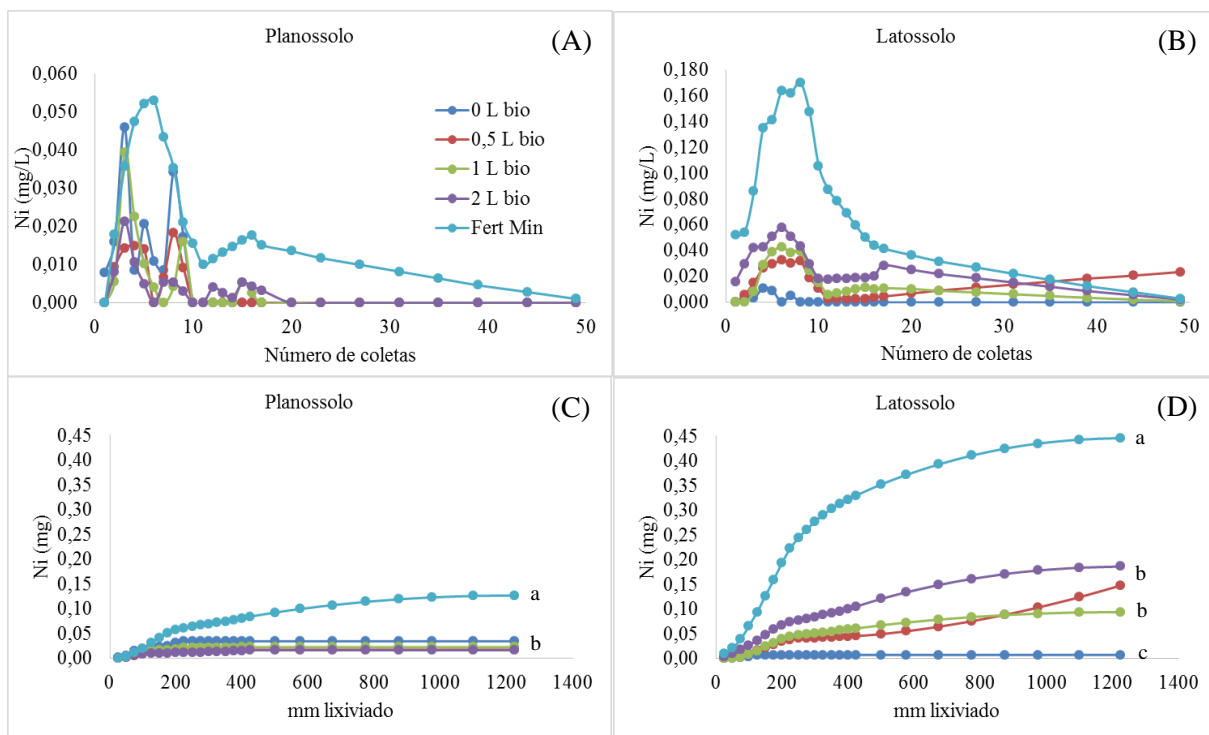


**Figura 16.** Dinâmica de lixiviação de manganês (Mn) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.12 Níquel (Ni)

A maior lixiviação de níquel (Ni) se deu no tratamento com fertilizante mineral após 139,8 e 186,4 mm, sendo 0,05 e 0,17 mg/L para Planossolo e Latossolo (Figura 17A e 17B). Nas doses 0, 0,5, 1 e 2 L de biossólido obteve-se 0,04, 0,02, 0,04 e 0,02 mg/L para Planossolo (69,9, 186,4, 69,9 e 69,9 mm) (Figura 17A), e 0,01, 0,03, 0,04 e 0,06 mg/L para Latossolo (93,2, 139,8, 139,8 e 139,8 mm) (Figura 17B). A dose 2 L de biossólido se manteve superior no Latossolo (0,19 mg/coluna) (Figura 17D), enquanto para o Planossolo obteve-se 0,02 mg (Figura 17C). As doses controle e 0,5, 1 L de biossólido mantiveram maiores resultados de lixiviação em 0,03, 0,02, 0,02 e 0,007, 0,15, 0,09 mg/coluna de níquel para Planossolo e Latossolo, respectivamente (Figuras 17C e 17D).

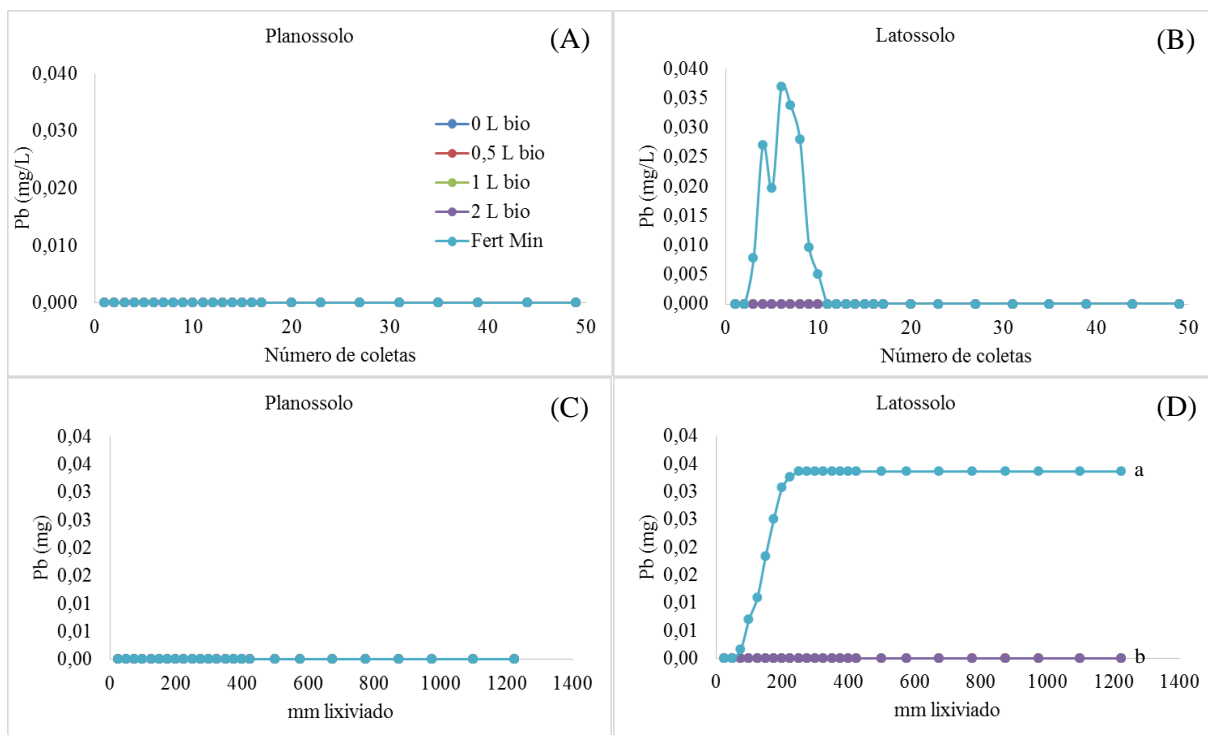
O tratamento mineral se destacou com maior lixiviação de níquel para ambos os solos. No Latossolo as doses de biossólido não apresentaram diferença entre si e o controle obteve menores valores de lixiviação (Figura 17D). No Planossolo não foram observadas diferenças entre as doses de biossólido e o tratamento controle (Figura 17C).



**Figura 17.** Dinâmica de lixiviação de níquel (Ni) em colunas preenchidas com Planosolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.13 Chumbo (Pb)

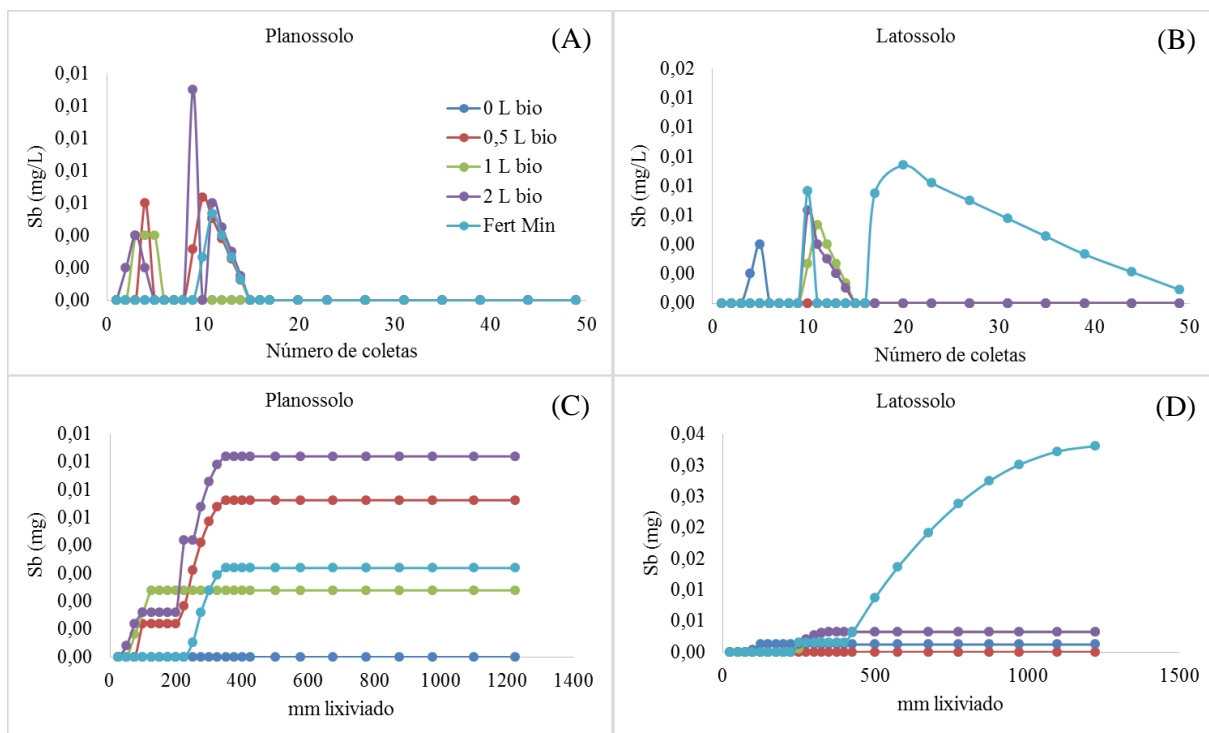
Não foi verificada lixiviação de chumbo (Pb) no Planosolo durante todo período de lixiviação (Figura 18A), conseqüentemente não houve acúmulo deste para este tipo de solo e diferença entre as doses de biossólido em relação ao fertilizante mineral (Figura 18C). Para o Latossolo apenas foi detectada lixiviação de 0,04 mg/L no tratamento com fertilizante mineral tendo sido aplicados 139,8 mm (Figura 18B), logo, o acúmulo de 0,03 mg/coluna de Pb ao final do período de lixiviação apenas foi observado para esse tratamento, sendo assim, este tratamento diferiu das demais doses de biossólido e tratamento controle (Figura 18D).



**Figura 18.** Dinâmica de lixiviação de chumbo (Pb) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.14 Antimônio (Sb)

O elemento antimônio (Sb) apresentou comportamento errático durante o período de lixiviação, sendo 0,01 mg/L o máximo observado para ambos os solos, detectados no tratamento 2 L de biossólido para o Planossolo (Figura 19A), totalizando 0,01 mg/coluna ao final da lixiviação (Figura 19C), e no tratamento com fertilizante mineral para o Latossolo (Figura 19B), acarretando um acúmulo final de 0,03 mg (Figura 19D).



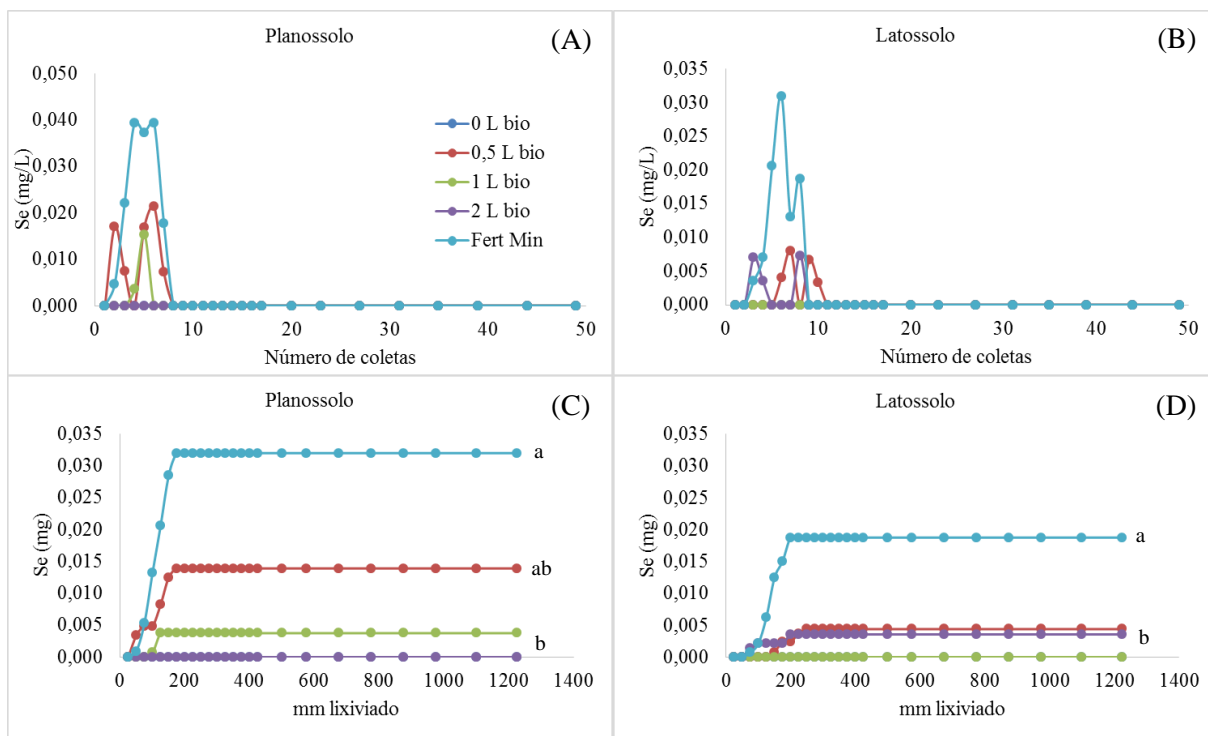
**Figura 19.** Dinâmica de lixiviação de antimônio (Sb) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de bio-sólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.15 Selênio (Se)

Aos 93,2 mm obteve-se 0,04 mg/L de selênio (Se) lixiviado no Planossolo (Figura 20A), enquanto no Latossolo esse valor foi de 0,03 mg/L obtido aos 139,8 mm (Figura 20B).

No Planossolo a dose 0,5 L de bio-sólido não apresentou diferença em relação ao tratamento mineral, tendo lixiviado 0,03 mg/L aos 46,6 mm. Este tratamento por sua vez não apresentou diferença com relação às doses 1, 2 L e o tratamento controle (0,02 mg/L aos 23,3 mm aplicados) (Figura 20C).

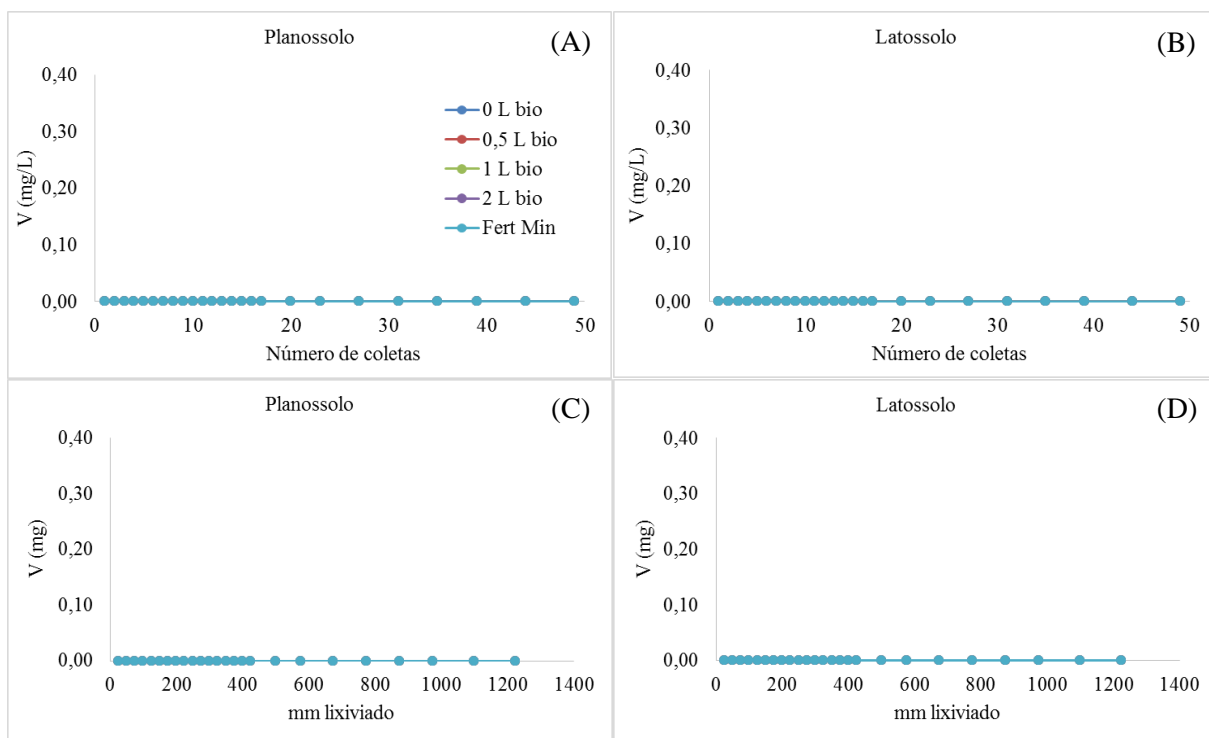
No Latossolo o tratamento com fertilizante mineral se destacou com maior lixiviação que os demais, nos quais não foi verificada diferença estatística. Em todos estes houve lixiviação de 0,02 mg/L (Figura 20D).



**Figura 20.** Dinâmica de lixiviação de selênio (Se) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.16 Vanádio (V)

Não foi detectado vanádio (V) no lixiviado de nenhuma coluna, tanto no tratamento controle quanto nas colunas que receberam biossólido e fertilizante mineral em ambos os solos. Logo, não foi observado vanádio acumulado na coluna ao final da fase de lixiviação (Figura 21).



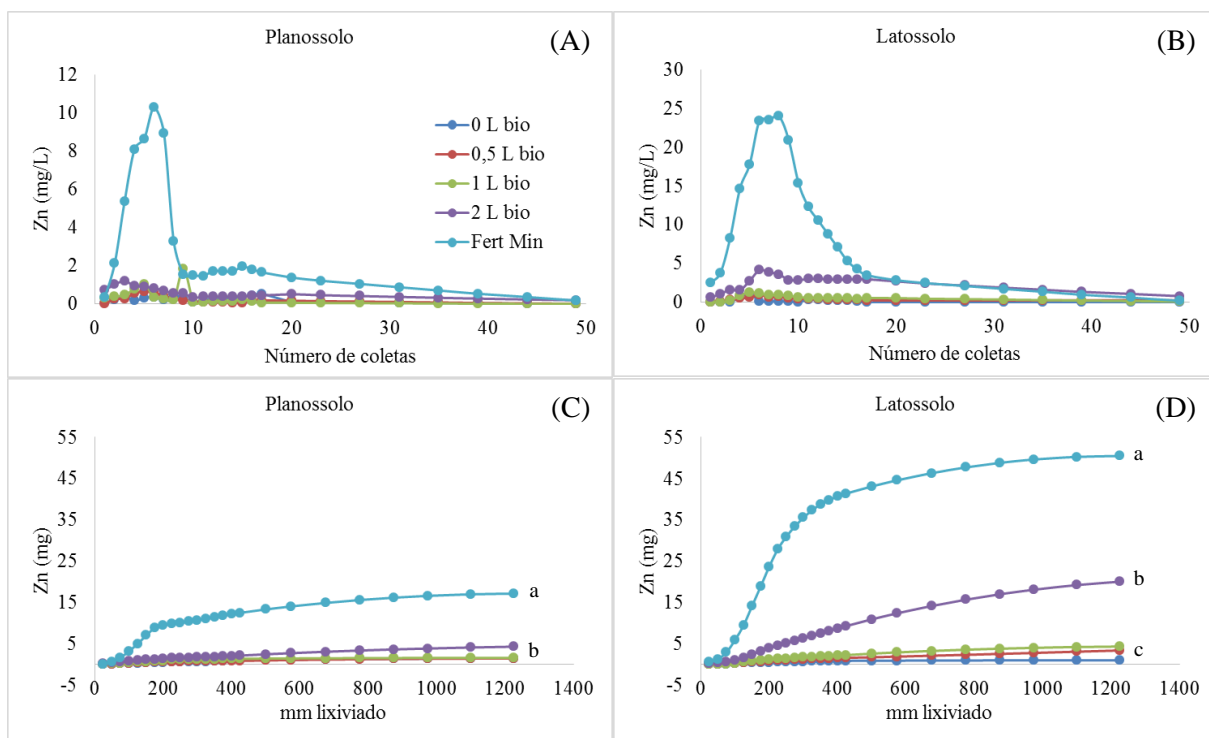
**Figura 21.** Dinâmica de lixiviação de vanádio (V) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biofóssido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.3.17 Zinco (Zn)

As maiores concentrações de zinco (Zn) no lixiviado foram detectadas no tratamento com fertilizante mineral em ambos os solos. Para o Planossolo o pico de lixiviação de zinco foi de 10,30 mg/L após 139,8 mm (Figura 22A), sendo acumulados 17,13 mg/coluna de zinco ao final do período de lixiviação (Figura 22C). Não foi detectada diferença entre as doses de biofóssido e o tratamento controle.

No Latossolo obteve-se comportamento semelhante, onde o maior pico de lixiviação se deu no tratamento com fertilizante mineral atingindo 24,03 mg/L após 186,4 mm (Figura 22B), enquanto a dose 2 L de biofóssido proporcionou lixiviação de 4,19mg/L após 139,8 mm (Figura 22B). O maior acúmulo de zinco se deu no tratamento com fertilizante mineral com 50,45 mg/coluna (Figura 22D). A dose de 2 L de biofóssido diferiu das demais, enquanto estas não apresentaram diferença com relação ao controle (Figura 22D).





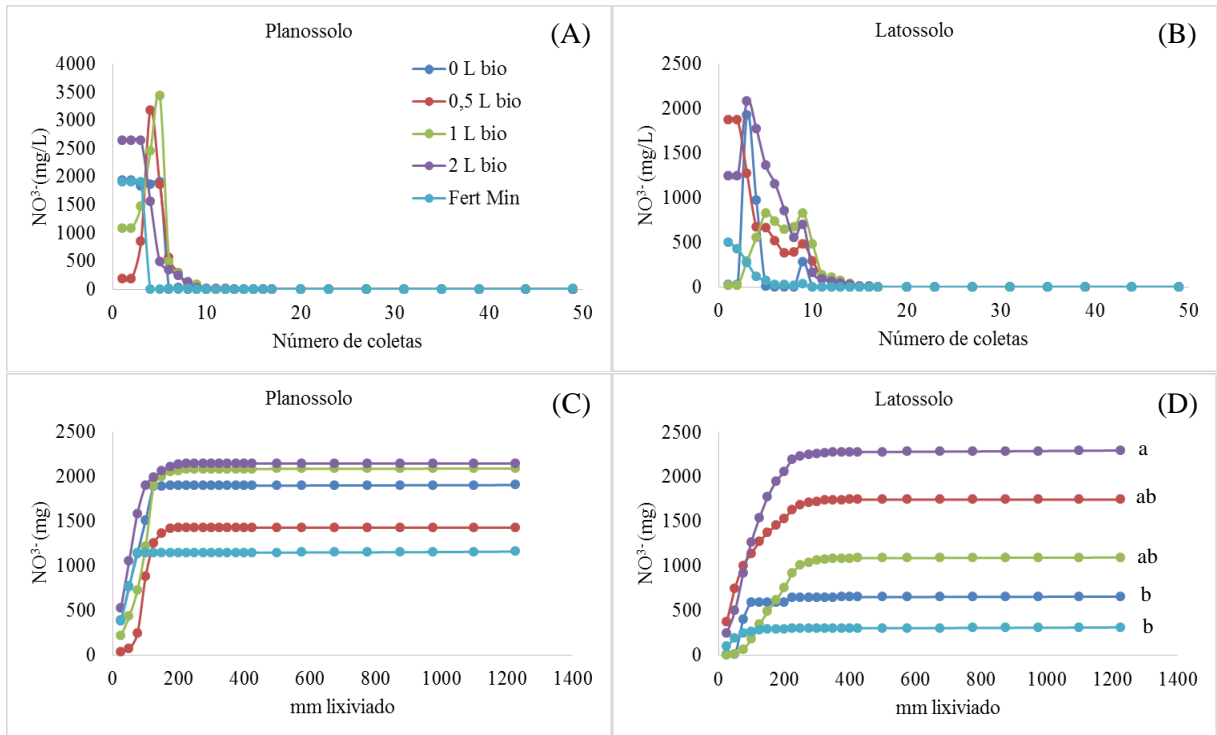
**Figura 22.** Dinâmica de lixiviação de zinco (Zn) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biofóssido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

## 5.4 Dinâmica de lixiviação de macronutrientes

### 5.4.1 Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )

Foi detectado nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) no lixiviado de todos os tratamentos em ambos os solos durante todo o período de lixiviação. No entanto, no Planossolo 98% do total foi lixiviado já nos primeiros 140 mm (Figura 23A), enquanto que no Latossolo isso ocorreu após lixiviação de 240 mm (Figura 23B). Os picos de concentração no lixiviado variaram de 1900 mg/L no controle e no tratamento com fertilizantes minerais, a 3433 mg/L no tratamento com 1 L de biofóssido (Figura 23A). No entanto, não houve diferença significativa entre tratamentos para o conteúdo total de nitrato lixiviado no Planossolo. O conteúdo total de nitrato lixiviado variou de 1160 a 2150 mg/coluna (Figura 23C).

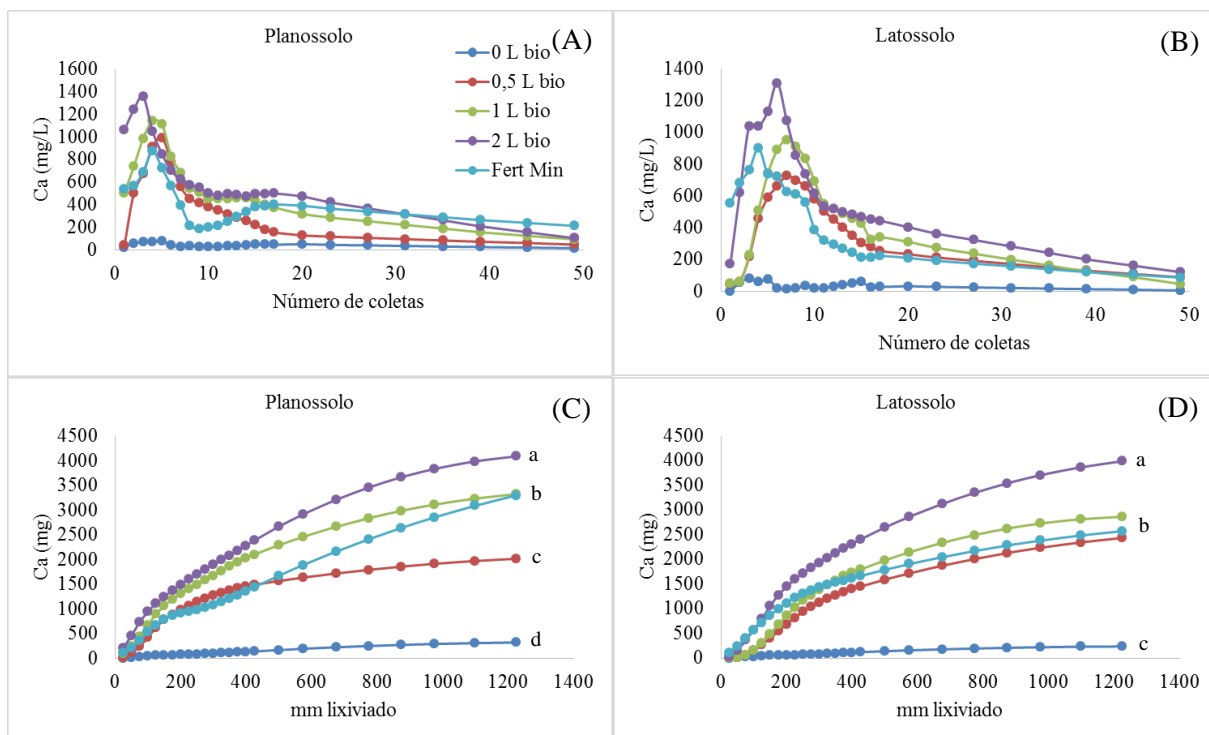
No Latossolo, os maiores picos de nitrato no lixiviado ocorreram para os tratamentos controle e com aplicação de 0,5 e 2 L de biofóssido com concentrações entorno de 2000 mg/L de nitrato após cerca de 70 mm de água aplicados (Figura 23B). A maior lixiviação acumulada de nitrato ocorreu no tratamento com aplicação de 2 L de biofóssido, o qual foi estatisticamente superior ao controle e ao tratamento com fertilizante mineral (Figura 23D). Os tratamentos com aplicação de doses de 0,5 L e 1 L de biofóssido não diferiram dos demais tratamentos quanto à lixiviação acumulada de nitrato (Figura 23D).



**Figura 23.** Dinâmica de lixiviação de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

#### 5.4.2 Cálcio (Ca)

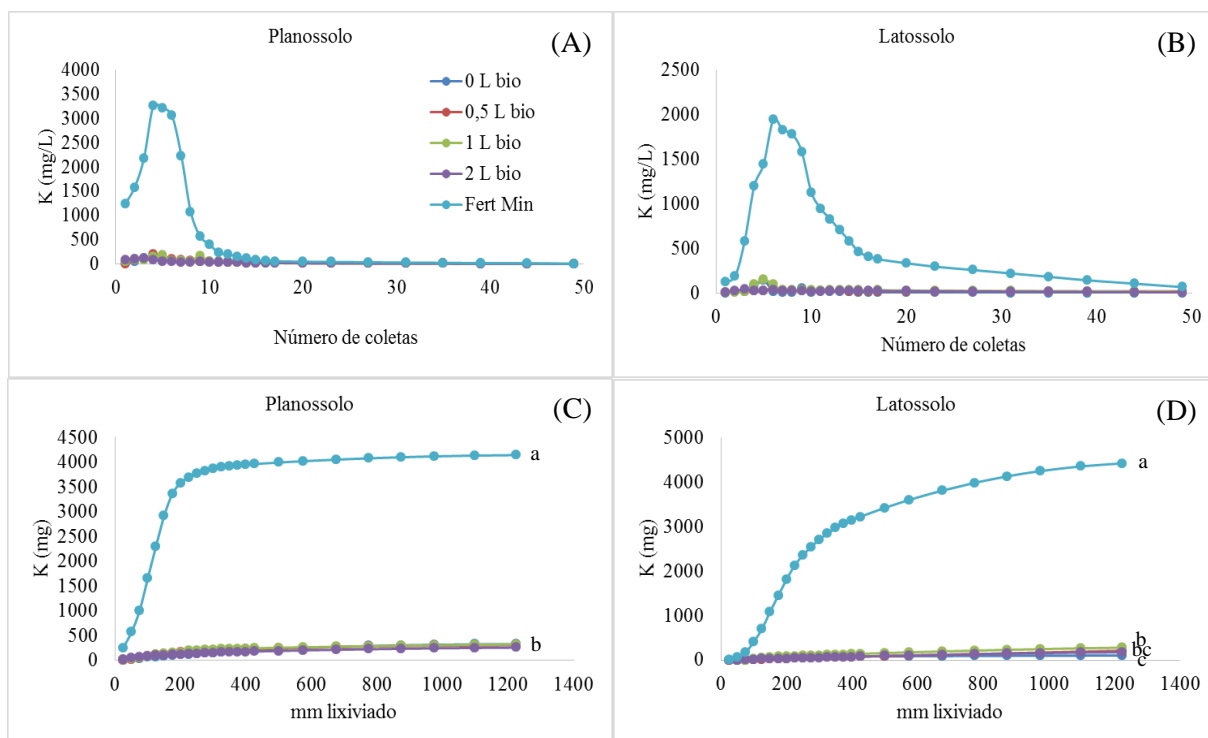
O elemento cálcio (Ca) foi encontrado no lixiviado de todos os tratamentos, tanto no solo arenoso quanto no argiloso. Contudo, a lixiviação em ambos os solos foi cerca de 16 vezes superior no tratamento com fertilizante mineral, quando comparado ao tratamento controle ao final do experimento (Figura 24 A e 24 B). No entanto, no decorrer do período de lixiviação, o acúmulo de cálcio no tratamento onde foi aplicado 2 L de biossólido foi cerca de 12 vezes maior para o Planossolo, tendo lixiviado um total de 4088,9mg/coluna e 16 vezes no Latossolo, totalizando 3989,5 mg/coluna, em relação ao tratamento controle (Figura 24 C e 24 D).



**Figura 24.** Dinâmica de lixiviação de cálcio (Ca) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

### 5.4.3 Potássio (K)

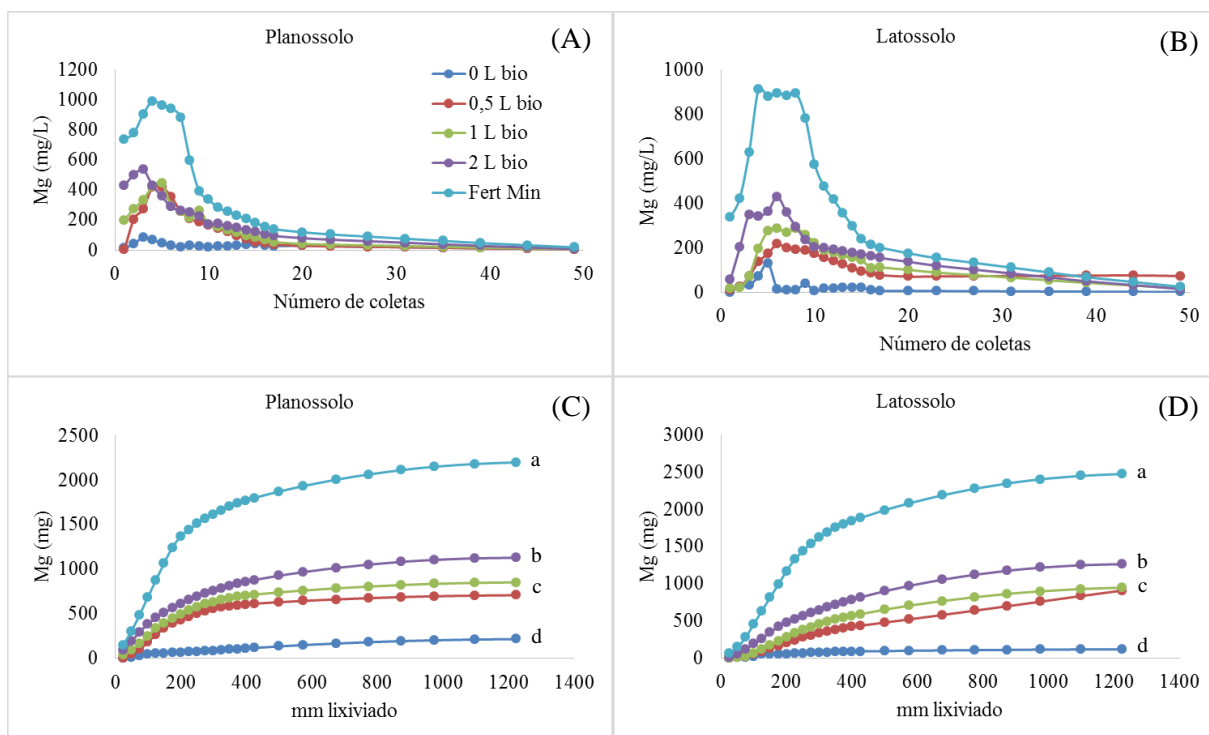
Foi possível verificar o elemento potássio (K) praticamente apenas no lixiviado das colunas que receberam fertilizante mineral (Figura 25A e 25B). No Planossolo o pico máximo obtido foi de 3224 mg/L após 116,5 mm de água (Figura 25A), totalizando 4138 mg (Figura 25C), o que corresponde a 86,2 % do total de potássio adicionado na coluna. No Latossolo o máximo lixiviado foi de 1942 mg/L após 139,8 mm de água (Figura 25B), totalizando 4430 mg (Figura 25D), correspondente a 92,3 % do total adicionado.



**Figura 25.** Dinâmica de lixiviação de potássio (K) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

#### 5.4.4 Magnésio (Mg)

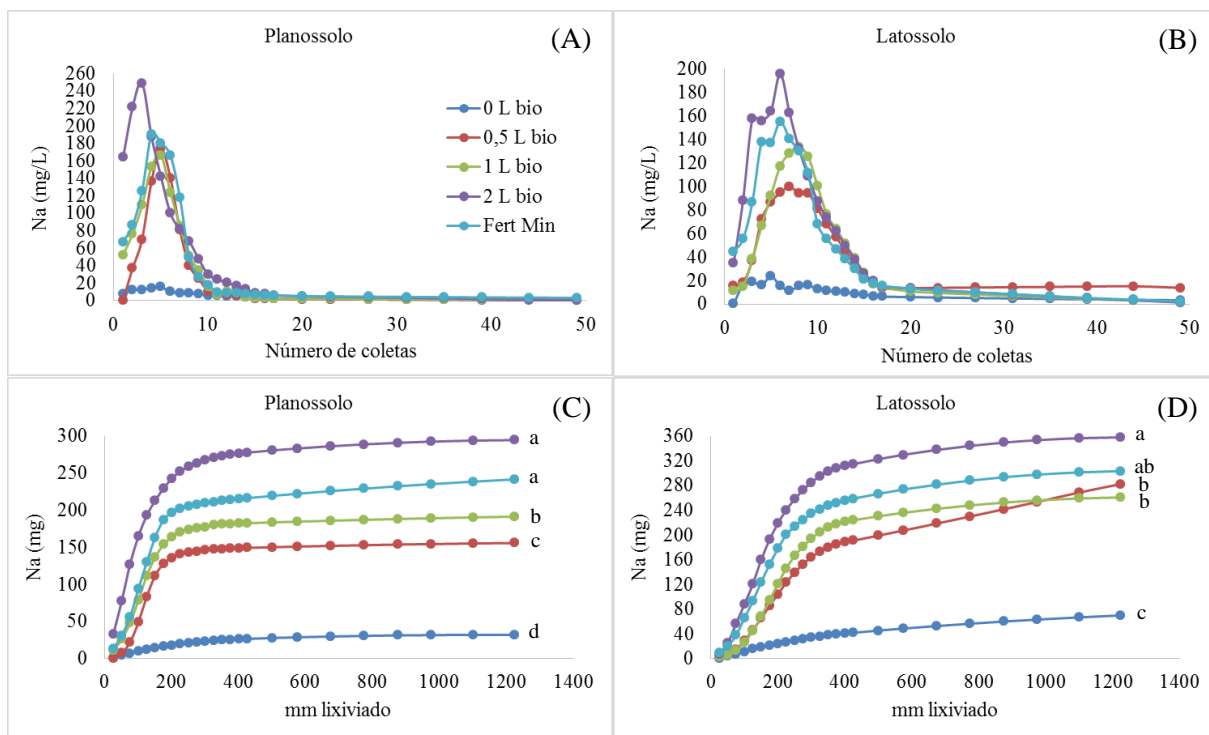
Foi possível verificar o elemento magnésio (Mg) em todos os tratamentos, porém, mais fortemente no tratamento com fertilizante mineral em ambos os solos (Figura 26 A e 26B). O pico máximo foi de 965,5 mg/L após 116,5 mm de água no Planossolo, e de 913,7 mg/L após 93,2 mm de água no Latossolo. No Planossolo o acúmulo de magnésio no lixiviado foi 10 vezes superior ao tratamento controle (Figura 26C), enquanto no Latossolo essa diferença é de 20 vezes (Figura 26D).



**Figura 26.** Dinâmica de lixiviação de magnésio (Mg) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

#### 5.4.5 Sódio (Na)

O elemento sódio (Na) foi detectado principalmente no tratamento onde foi feita aplicação de 2 L de biossólido. A maior lixiviação no Planossolo foi de 249 mg/L (Figura 27A), acumulando 295,5 mg (Figura 27C) e no Latossolo foi de 196 mg/L (Figura 27B), com acúmulo total de 357,8 mg (Figura 27D). O acúmulo no lixiviado com relação a este tratamento foi 9,2 vezes superior ao acumulado no tratamento controle para o Planossolo (Figura 27C), enquanto no Latossolo esse acúmulo foi 5,1 vezes superior (Figura 27D).

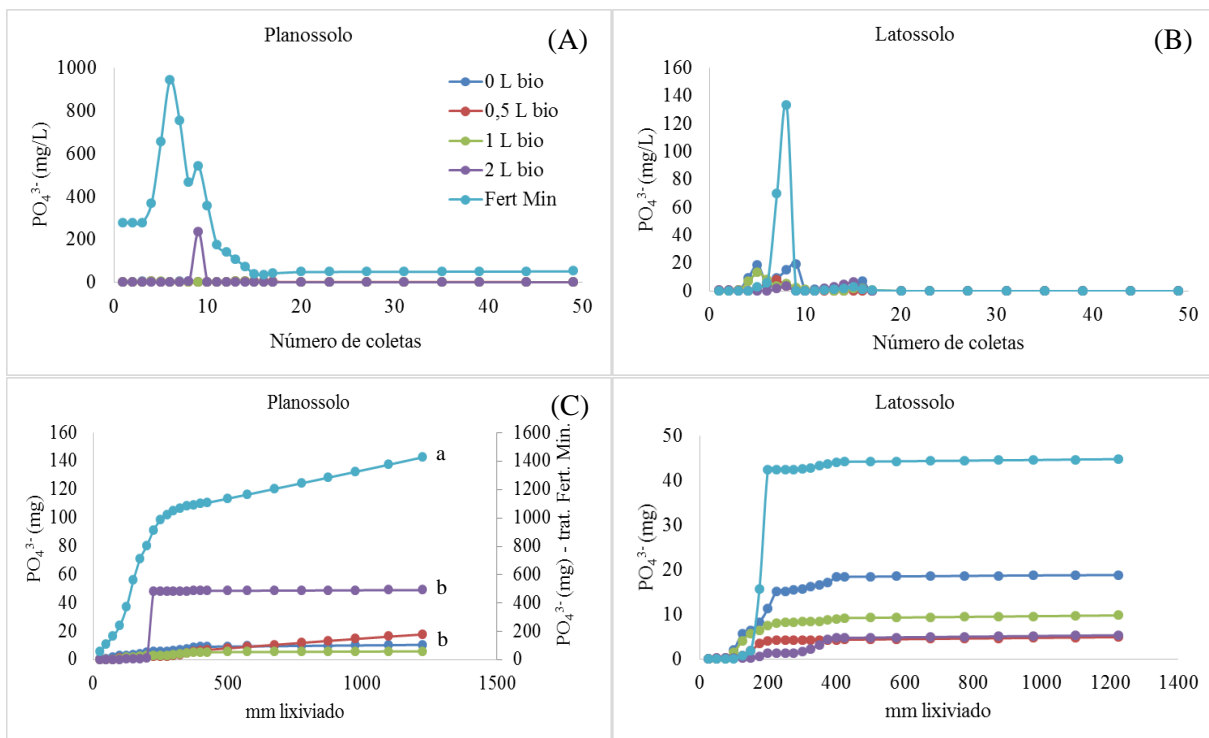


**Figura 27.** Dinâmica de lixiviação de sódio (Na) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de bio sólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

#### 5.4.6 Fósforo ( $\text{PO}_4^{3-}$ )

Uma elevada lixiviação de fósforo ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) foi observada no Planossolo que recebeu fertilizante mineral, sendo cerca de 31 vezes maior do que no Latossolo sob esse mesmo tratamento (Figura 28A). Houve um pico de fósforo no lixiviado no Planossolo que recebeu fertilizantes minerais de 940 mg/L após a lixiviação de 140 mm de água, enquanto que no Latossolo houve um pico de 133 mg/L após 186 mm lixiviados (Figura 28B).

O acúmulo de 1.428 e 45 mg/coluna de fósforo se deu ao final do período de lixiviação para o tratamento com fertilizante mineral no Planossolo (Figura 28C) e Latossolo (Figura 28D), respectivamente. No Planossolo, o tratamento mineral obteve maior lixiviação e as doses de bio sólido não mostraram diferença entre si e em relação ao controle (Figura 28C). Para o Latossolo não houve diferença significativa entre os tratamentos (Figura 28D).

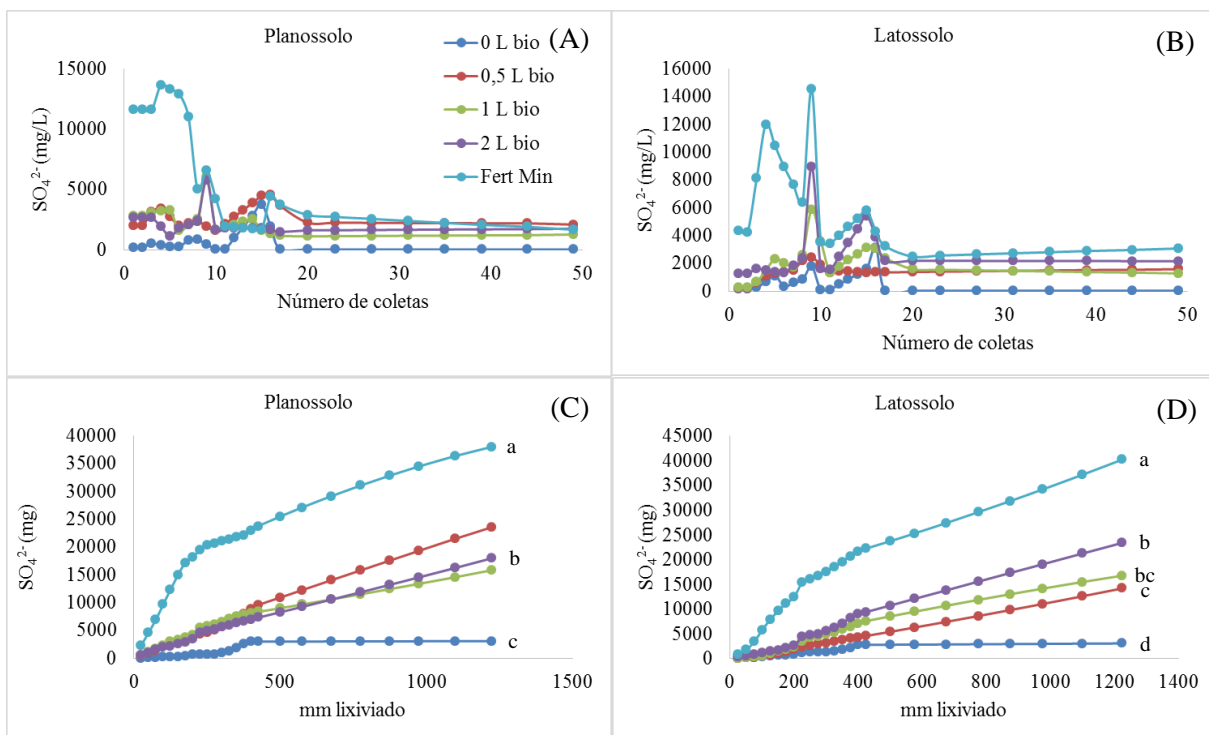


**Figura 28.** Dinâmica de lixiviação de fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biofóssido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.

#### 5.4.7 Sulfato ( $SO_4^{2-}$ )

O sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) foi detectado em todos os lixiviados. Contudo, a quantidade total lixiviada no tratamento com fertilizante mineral foi aproximadamente 186 vezes superior no Planossolo quando comparado ao tratamento controle (Figura 29A). No Latossolo esse valor alcançou o máximo de 64 vezes superior ao tratamento controle (Figura 29B).

Para o Planossolo obteve-se um pico de 13664 mg/L após 93,2 mm lixiviados (Figura 29A), com acúmulo total de 38059 mg/coluna após a lixiviação dos 1200 mm (Figura 29C). Para o Latossolo observou-se um pico de 14548 mg/L após 209,7 mm lixiviados (Figura 29B), sendo acumulados ao final da fase de lixiviação o total de 40247 mg/coluna (Figura 29D).



**Figura 29.** Dinâmica de lixiviação de sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) em colunas preenchidas com Planossolo de textura arenosa (A e C) ou Latossolo de textura argilosa (B e D) condicionadas com 0, 0,5, 1 ou 2 L de biossólido de lodo de esgoto ou fertilizantes minerais (Tabelas 4 e 6). Os gráficos A e B mostram a concentração do elemento no lixiviado e C e D a quantidade acumulada em função da lâmina d'água aplicada. Letras diferentes indicam diferenças entre tratamentos para o total do elemento lixiviado.



## 6. DISCUSSÃO

### 6.1 Qualidade do biossólido e risco de contaminação do solo

O conhecimento sobre a composição química do lodo de esgoto é importante para desenvolver recomendações de taxas de aplicação na agricultura (BELTRÁN et al., 1999). Desse modo, as recomendações de uso são feitas com base na concentração de nutrientes (principalmente N, P e K) e sobre as concentrações de metais pesados.

Com relação ao potencial agrônômico do biossólido da ETE Ilha do Governador, os resultados demonstram altos teores de nutrientes enquadrando-o nos padrões observados para lodos de origem domiciliar (BETTIOL E CAMARGO, 2006), o qual considera a variabilidade na composição devido à origem do esgoto e processo de tratamento. Sendo assim, para tais requisitos o biossólido produzido na ETE Ilha do Governador atende as exigências para uso agrícola, sendo os teores de metais pesados presentes no biossólido muito inferiores aos níveis críticos restritivos para sua aplicação no solo. Contudo, esperava-se avaliar com este experimento, o comportamento destes metais durante um determinado período de tempo, sob a influência constante de chuva, uma vez aplicados ao solo. Os teores totais de arsênio, mercúrio e selênio ficaram abaixo do limite de determinação do método analítico utilizado, indicando que, se presente no biossólido, encontra-se em concentração inferior a 1 mg/kg.

Apesar dos teores de metais pesados se encontrarem abaixo do determinado como parâmetro de qualidade, caso em que se enquadra o biossólido utilizado, segundo Fjällborg et al. (2005), isso não anula os possíveis riscos de contaminação, pois sucessivas aplicações deste material podem levar ao acúmulo destes metais no solo. Desse modo, foi realizada uma estimativa da carga máxima de biossólido que poderia ser aplicada no solo antes de atingir os limites de metais previstos na legislação. Considerando a carga máxima acumulada permitida na Resolução CONAMA 375/2006 em kg/ha, e utilizando-se um lodo de esgoto que contenha em sua composição os teores máximos aceitáveis para ser considerado próprio para utilização segundo essa mesma resolução, poderia se aplicar uma carga total máxima de biossólido de 732 Mg/ha, necessária para elevar o teor do elemento arsênio no solo ao seu limite permitido (Tabela 9). Contudo, por requerer menor quantidade de biossólido para atingir o limite crítico (71 Mg/ha), o mercúrio seria o poluente de referência para definir o limite de aplicação.

Utilizando o mesmo raciocínio, conclui-se que seria necessário aplicar cerca de 700 Mg/ha do biossólido produzido na ETE Ilha do Governador para atingir o limite de chumbo (41 kg/ha), elemento mais restritivo no solo, conforme a simulação apresentada (Tabela 9). Logo, o risco ambiental de utilização do biossólido analisado nesse estudo é baixo considerando-se os requisitos mínimos de qualidade, com relação a metais, determinados na legislação. Ademais, entende-se que um biossólido com as características daquele usado nesse estudo servem não somente como substrato para a produção de mudas florestais, fertilizante para plantios de recomposição florestal com espécies nativas ou como condicionador de solos para recuperação de áreas degradadas como também em culturas agrícolas de ciclo curto, em que são necessárias aplicações periódicas (ABREU, 2014).

Foi realizada também uma simulação do risco de acúmulo de metais no solo tendo como referência a Resolução CONAMA 420/2009, a qual estabelece os limites de metais no solo acima dos quais existem riscos potenciais diretos ou indiretos à saúde humana. Todos os elementos apresentaram valores acumulados no solo consideravelmente abaixo dos limites exigidos pela legislação, tanto para valores de prevenção quanto valores de investigação. Sendo assim, pode-se concluir a respeito do baixo potencial de contaminação pelo acúmulo destes elementos no solo.

## 6.2 Risco ambiental: Água subterrânea

Considerando o pior cenário, onde não há absorção pelas plantas e nem a diluição destes elementos em maiores volumes de água subterrânea, nenhum dos metais pesados foi detectado no material lixiviado acima dos valores de intervenção determinados pela Resolução Conama nº 420 de 2009 (Tabela 11).

Estudos sobre a movimentação de metais pesados em solos tratados com biossólido sugerem que a quantidade de lixiviados pode ser sensivelmente maior em solos arenosos com baixos teores de matéria orgânica e sujeitos a chuvas intensas (BERTONCINI E MATTIAZZO, 1999). Os resultados desse estudo contradizem esses estudos, uma vez que, em geral, a lixiviação de metais foi similar entre o solo com textura arenosa e o solo com textura argilosa (Tabela 10). De fato, os únicos metais lixiviados em percentuais relativamente altos em relação ao adicionado via biossólido foram o manganês (~6 a 16%), selênio (~11%) e especialmente o boro (~50%).

De um modo geral, os metais pesados adicionados ao solo via aplicação de biossólido permanecem retidos na camada superficial por processos de adsorção ou complexação, até que mudanças ocorram no sistema (TAYLOR et al., 1995). No Brasil, estudos têm demonstrado que os metais Cr, Cu, Ni e Pb presentes no biossólido apresentam baixa mobilidade, acumulando-se na camada do solo onde o biossólido foi incorporado, informação que corrobora os dados desse estudo. Já o Zn e principalmente o Cd são considerados relativamente móveis e, portanto, apresentariam maior potencial para contaminar o subsolo e as águas subterrâneas (OLIVEIRA, 2000). Entretanto, nesse estudo ambos se mostraram pouco móveis com o total de zinco e cádmio lixiviados em 1250 mm variando de 0,5 a 3% do total adicionado para o zinco e de 0 a 0,3% para o cádmio. Contudo, o efeito tampão do solo pode ter atuado amenizando estes resultados, logo, um lote de biossólido contendo teor mais elevado destes elementos, poderia ocasionar diferentes resultados.

Matos (1995) define como principais características do solo que afetam a retenção e mobilidade de metais pesados, o pH, a CTC, a quantidade de matéria orgânica, a quantidade e tipo de minerais na fração argila (argilas silicatadas e óxidos) e competição iônica. Assim, pode-se especular que a baixa mobilidade dos metais verificados nesse estudo pode estar relacionada ao alto conteúdo de matéria orgânica e CTC do próprio biossólido. Uma baixa lixiviação de metais, também pode estar relacionada com a interação dos fatores como: elevação do pH do solo, presença de ligantes orgânicos e cálcio devidos à aplicação do biossólido e óxidos de Fe e Al nos solos. Mattiazzo-Prezotto (1994) utiliza essa interação para explicar a ausência de metais no material percolado através de solos tratados com biossólidos ou outros resíduos que contêm metais pesados.

De acordo com Reeves (1997) a matéria orgânica do solo desempenha papel essencial na disponibilidade tanto de nutrientes quanto de metais pesados para as plantas. A elevada concentração de grupamentos funcionais, como grupos carboxílicos, fenólicos, alcoólicos, enólicos, carbonilas e sulfidrilas, na superfície dos componentes orgânicos, que fornecem sítios para sorção de cátions, explicam a capacidade de interação entre a matéria orgânica do solo e os cátions metálicos (STEVENSON, 1994). Os grupamentos funcionais possibilitam uma alta reatividade da MOS com os cátions metálicos, o que resulta na formação de complexos e quelatos de diferentes estabilidades e características estruturais (SPOSITO, 2008). Diversos compostos da matéria orgânica podem influenciar a disponibilidade de metais, porém, as substâncias húmicas, que constituem cerca de 80% da matéria orgânica do solo, exercem a maior contribuição na complexação dos metais (STEVENSON, 1991).

CANELLAS et al. (1999) ao avaliar a influência dos ácidos húmicos obtidos a partir de compostos de lixo e de lodo de esgoto, na adsorção de Cu e Cd por meio das isotermas e

espectros infravermelhos, verificaram a existência de elevada afinidade inicial dos ácidos húmicos por ambos os elementos, reduzindo a disponibilidade destes.

Logo, pode-se entender que a matéria orgânica acrescentada pelo biossólido de lodo de esgoto acaba por promover uma maior imobilização dos metais, reduzindo assim os teores destes no lixiviado do solo. Reeves (1997) afirma que apesar de ser fonte de metais, o lodo pode também ser considerado agente imobilizador de metais, pois sua elevada carga orgânica atua como controlador de metais pesados devido às reações de complexação e quelatação, reduzindo sua mobilidade e disponibilidade. Contudo, à medida que ocorre a decomposição da matéria orgânica, é provável que haja uma repentina elevação dos teores disponíveis de alguns metais pesados, promovendo simultaneamente a redução do pH e a capacidade de troca catiônica (MCBRIDE, 1995).

Sendo assim, um estudo aprofundado quanto a associação dos cátions metálicos com as frações húmicas presentes na matéria orgânica pode auxiliar no entendimento dos mecanismos envolvidos na redução ou na elevação da disponibilidade de metais durante o processo de humificação.

A maior lixiviação magnésio no tratamento com fertilizante mineral pode ser devido à formação de complexos de esfera externa com a fase sólida do solo, o que permite a movimentação mais livre com a passagem da água (SPOSITO, 1989). O cálcio e o sódio, apesar de atuarem da mesma maneira, apresentaram lixiviação bastante superior no tratamento com aplicação de 2 L de biossólido, mais provavelmente devido a elevada concentração destes elementos no resíduo.

Para vanádio não foi observada lixiviação. Para antimônio esta praticamente não houve, provavelmente devido a sua baixa concentração. No Planossolo o tratamento com maior aplicação de biossólido se mostrou superior aos demais, enquanto no Latossolo esse comportamento foi observado no tratamento com fertilizante mineral, porém, esse valor nunca foi superior a 0,01 mg/L. Contudo, ao se comparar estes resultados com o valor de intervenção em água subterrânea, o valor de 10 µg/L, conferindo aspecto de risco de contaminação deste elemento.

Potássio e sulfato sofreram maior lixiviação no tratamento com fertilizante mineral, podendo-se supor que isto seja devido a concentração destes elementos nos fertilizantes aplicados.

A maior perda de alumínio por lixiviação no Planossolo se deu no tratamento controle, o que pode ser em consequência da baixa CTC deste solo.

### **6.3 Lixiviação de ânions nitrato e fosfato**

Os nutrientes mais limitantes em ambientes aquáticos são o N e P. Entretanto, quando esses dois estão presentes em quantidades elevadas, geralmente se estabelece condições para o processo de eutrofização do corpo d'água. Os íons  $\text{NO}_3^-$  e  $\text{PO}_4^{3-}$  podem promover a eutrofização de rios e lagos por favorecerem a proliferação de algas capazes de produzir toxinas e diminuir o conteúdo de oxigênio nas camadas subsuperficiais da água (SHUMAN, 2002).

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (US – EPA) estabeleceu um nível máximo de contaminação de 10 mg/L de nitrato em águas subterrâneas e de 0,05 mg/L de fosfato em um córrego afluente de um lago ou reservatório. Em córregos que não descarregam diretamente em lagos ou reservatórios esse limite não deve exceder 0,1 mg/L de fosfato (EPA, 1987).

Os valores de nitrato para ambos os solos também se mostraram bastante elevados para Planossolo e Latossolo. Apesar do resultado se encontrar abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 420/2009, uma nova aplicação de biossólido poderia ultrapassar o limite permitido tornando o ambiente contaminado (Tabela 11). Contudo, a profundidade da coluna pode ter influenciado estes resultados, podendo-se supor que em um perfil de solo mais profundo esses valores de lixiviado podem ser reduzidos.

Segundo Barbosa e Tavares Filho (2006) um problema potencial do lodo de esgoto é a presença de nitratos na sua composição. A falta de sincronismo entre a mineralização do nitrogênio e a absorção deste pelas plantas, pode ocasionar a perda deste por lixiviação levando à contaminação do lençol freático, ou ainda por desnitrificação contribuindo com a emissão de óxido nitroso ( $N_2O$ ), gás que contribui para o efeito estufa.

Mamo et al. (1999) afirmam que os biossólidos apresentam grande quantidade de nitrogênio em sua composição, principalmente na forma orgânica e que, portanto, não estão prontamente disponíveis para absorção pelas plantas. Contudo, esse nitrogênio após mineralizado pode ser convertido a  $NO_3^-$ , podendo levar a contaminação tanto de águas superficiais por arraste de enxurradas, quanto de águas subterrâneas por lixiviação. Por não ser retido pelas partículas do solo, o ânion nitrato permanece livre em solução, assim, quando a quantidade presente no solo excede a capacidade de absorção pelas raízes das plantas existe a possibilidade de lixiviação no perfil do solo, podendo com o tempo atingir o lençol freático e os corpos d'água por ele alimentados (BETTIOL E CAMARGO, 2006). A ausência de espécies vegetais na coluna de lixiviação pode ter contribuído para a grande quantidade de nitrato percolado, uma vez que este após mineralizado não foi absorvido permanecendo livre e passível de ser lixiviado.

Trannin et al. (2008) constataram aumento nos teores de  $NO_3^-$  e de Na com as doses de biossólido industrial em profundidade no solo, atingindo 53 e 47  $mg/dm^3$  nas camadas de 0,4 e 0,6 m respectivamente, com a aplicação de 24 Mg/ha, representando potencial poluente de águas subsuperficiais, após aplicações sucessivas deste resíduo.

Boeira et al. (2002) avaliando a aplicação de biossólido originado de esgoto urbano por quatro anos consecutivos em Latossolo, observaram que mesmo em dose equivalente à adubação mineral recomendada para a cultura, este superou as necessidades do milho por nitrogênio e apresentou risco de lixiviação de  $NO_3^-$ .

Costa et al. (2014) avaliando a lixiviação de amônio, nitrato e fosfato em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Latossolo Vermelho Distroférico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, observaram que a aplicação de lodo de esgoto aumentou a quantidade lixiviada de amônio no Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e de nitrato no Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Latossolo Vermelho Distroférico e Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Em outro estudo, Oliveira et al. (2001) concluíram que a incorporação de doses a partir de 33 Mg/ha de lodo de esgoto em Latossolos ocasionou riscos de contaminação de águas subterrâneas por  $NO_3^-$ .

Em seu manual técnico de utilização agrícola do lodo de esgoto, a Companhia de Saneamento do Paraná destaca o nitrogênio como possível limitante para a dosagem máxima de lodo a ser aplicado ao solo, devido à possibilidade deste em lixiviar nitrato e causar a contaminação do lençol freático.

Oliveira e Mattiazzo (2001), estudando a lixiviação de nitrato em solo cultivado com cana-de-açúcar, observaram a ocorrência de lixiviação deste íon até 90 cm de profundidade para as doses de 33, 66 e 99 Mg/ha, até o 16º mês após a aplicação, evidenciando a mobilidade deste elemento.

A lixiviação de fosfato é outro ponto a ser observado, pois a adição de lodo de esgoto pode modificar a capacidade de adsorção do elemento (MUNHOZ E BERTON, 2006), uma vez que devido à liberação de ácidos orgânicos durante a decomposição do lodo, que podem bloquear os mesmos sítios de adsorção usados pelo fósforo, diminuindo a fixação do elemento no solo ou substrato (HAYNES, 1984).

Considerando a aplicação de 10 m<sup>3</sup>/ha de biossólido foi estimada uma concentração de fosfato na água subterrânea percolada de 175,7 e 19,0 µg/L para Planossolo e Latossolo, respectivamente (Tabela 11). Caso essa água percolada atingisse um corpo d'água superficial e fosse diluída em uma proporção de 1:10, poderia-se estimar o risco de eutrofização com base na Classificação do Estado Trófico segundo o Índice de Carlson (CETESB, 2007). De acordo com essa premissa, a água de rios ou reservatórios que recebessem a água percolada no Planossolo e Latossolo se enquadraria como oligotrófica e ultraoligotrófica, respectivamente. Logo, por essa simulação não há risco de contaminação de águas superficiais por fosfatos lixiviados do biossólido, considerando uma aplicação de 10 m<sup>3</sup>/ha. Porém, um experimento com maior período de duração poderia ser planejado, visando a consolidação desta afirmativa.

O fósforo na forma de fosfato geralmente não apresenta problema em água subterrânea, uma vez que este é retido no solo por mecanismos eletrostáticos e não eletrostáticos, o que geralmente impede a lixiviação na maioria dos solos. Contudo, em solos arenosos com pouco teor de argila, óxidos de Fe e Al, ou matéria orgânica, o fosfato pode sofrer lixiviação através do solo e causar impacto na qualidade de águas subterrâneas. Talvez a maior preocupação seja a contaminação de córregos e lagos através de escoamento superficial e erosão. Já o nitrogênio na forma de nitrato é fracamente retido pelos solos e lixiviam facilmente. Logo, a contaminação de águas subterrâneas por nitratos é um problema maior em áreas de solos arenosos (SPARKS, 2003).

## 7. CONCLUSÕES

- Tendo como referência a Resolução CONAMA nº 375 de 2006, o bio sólido da ETE Ilha do governador atende aos requisitos de qualidade com relação a metais pesados, não demonstrando perigo de contaminação do solo e de águas subterrâneas, sendo, portanto, passível a sua utilização para fins agrícolas e florestais.
- A maior parte do conteúdo de metais adicionados ao solo através da aplicação do bio sólido não foi lixiviada, independente do tipo de solo (Planossolo arenoso ou Latossolo argiloso), provavelmente em razão do alto conteúdo de matéria orgânica do bio sólido.
- O Planossolo lixiviou maiores quantidades, em mg/coluna, de prata, arsênio, bário, cobalto, cromo, cobre, manganês, selênio, fosfato e cálcio em relação ao Latossolo. Por outro lado, o Latossolo lixiviou mais boro, cádmio, ferro, níquel, chumbo, zinco, nitrato, alumínio, antimônio, magnésio, sódio, sulfato e potássio do que o Planossolo;
- Colunas condicionadas com solos que receberam mistura de fertilizantes minerais, em dose de macronutrientes equivalente à fornecida por 1 L de bio sólido, lixiviaram mais metais pesados que aquelas condicionadas com bio sólido, com exceção de bário e nitrato em ambos os solos, cobre e ferro no Planossolo e fosfato no Latossolo.
- A lixiviação de cálcio e sódio se mostrou superior no tratamento com maior aplicação de bio sólido, enquanto magnésio, potássio e sulfato foram detectados mais fortemente no tratamento com fertilizante mineral.
- Não foi observada lixiviação de vanádio.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Novas pesquisas envolvendo análises complementares ao presente estudo são necessárias visando acrescentar informações que venham enriquecer os dados já apresentados. Por exemplo, o fracionamento geoquímico dos dois tipos de solo utilizados buscando identificar a contribuição de cada tipo de solo para a contaminação de águas subterrâneas, ou ainda com relação ao acúmulo de elementos como ferro e manganês. Mais estudos também podem ser desenvolvidos objetivando investigar os diferentes grupos funcionais da matéria orgânica presentes no biossólido, auxiliando no entendimento a respeito da retenção de cada metal em função da atratividade com determinados grupos. Outra questão a ser respondida por pesquisas científicas é a determinação de metais nas diferentes frações húmicas, com vistas a compreender de maneira mais aprofundada o comportamento dos metais pesados quando retidos na matéria orgânica presente no biossólido, buscando subsídios que possibilitem o entendimento com relação ao tempo que esses metais permaneceriam retidos nestas frações, e como o processo de humificação poderia influenciar a retenção destes e na consequente liberação para a solução do solo.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, A. H. M. **Biossólido na produção de mudas florestais da Mata atlântica**. 2014. 79 f. Dissertação (Mestre em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural Do Rio De Janeiro, Seropédica, RJ, 2014.
- ALLEONI, L. R. F.; IGLESIAS, C. S. M.; MELLO, S. C.; CAMARGO, O. A.; CASAGRANDE, J. C.; LAVORENTI, N. A. Atributos do solo relacionados à adsorção de cádmio e cobre em solos tropicais. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 27, n. 4, p. 729-737, 2005.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; COSTA, L. M.; OLIVEIRA, C.; VELLOSO, A. C. X. Metais pesados em alguns fertilizantes e corretivos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 16, n. 2, p. 271-276, 1992.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X.; OLIVEIRA, C. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 9-16, 1997.
- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; BARRA, C. M.; LÃ, O. R. Química dos metais pesados nos solos. In: MELO, V. F. E ALLEONI, L. R. (Eds.). Química e mineralogia do solo (Parte II – Aplicações). Viçosa, MG, **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, n. 29, p. 249-312, 2009.
- ANDRADE, J. C. E ABREU, M. F. (Eds.). **Análise Química de Resíduos Sólidos para Monitoramento e Estudos Agroambientais**. Instituto Agronômico: Campinas. 2006. p.121-158.
- ANDREOLI, C. V. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura e sua influência em características ambientais no agrossistema**. 1999. 278 f. Tese (Doutorado em Meio Ambiente e Desenvolvimento). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S.; FERNANDES, F. Disposição do lodo no solo, capítulo 8, In.: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Org.). **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, Curitiba: SANEPAR, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 6, p. 319-398).
- ANJOS, A. R. M. E MATTIAZZO, M. E. Lixiviação de íons inorgânicos em solos repetidamente tratados com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 927-938, 2000.
- ASSENHEIMER, A. Benefícios do uso de biossólidos como substratos na produção de mudas de espécies florestais. **Ambiência**, v. 5, n. 2, p. 321-330, 2009.
- BARBOSA, G. M. C. E TAVARES FILHO, J. Uso agrícola do lodo de esgoto: influência nas propriedades químicas e físicas do solo, produtividade e recuperação de áreas degradadas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 27, n. 4, p. 565-580, 2006.



BELTRÁN, E.; DELGADO, M.; MIRALLES, I. R.; PORCEL, M.; BIGERIEGO, M. (1999). Sewage sludge treatment for agricultural use. Proc. 7<sup>th</sup> Mediterranean Congress of Chemical Engineering, Barcelona, Nov. 10-12. In: DELGADO, M. M. A. et al. Sewage sludge compost fertilizer effect on maize yield and soil heavy metal concentration. **Revista Interamericana de Contaminación Ambiental**, Coyoacán, n. 18, n. 3, p. 147-150, 2002.

BERTONCINI, E. I. E MATTIAZZO, M. E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 737-744, 1999.

BETTIOL, W. E CAMARGO, O. **Lodo de esgoto: Impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006, 349p.

BOEIRA, R. C.; LIGO, M. A. V.; DYNIA, J. F. Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, n.11, p.1639-1647, 2002.

BOEIRA, R. C. E SOUZA, M. D. **Movimento do herbicida tebutiuram no perfil de três tipos de solo através de colunas de lixiviação**. Jaguariúna, SP, Embrapa Meio Ambiente, 2005. (Comunicado Técnico, 25).

BOISSON, J.; RUTTENS, A.; MENCH, M.; VANGRONSVELD, J. Evaluation of hydroxiapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils. Part 1. Influence of hydroxiapatite on metal exchangeability in soil, plant growth and plant metal accumulation. **Environmental Pollution**, v. 104, p. 225-233, 1999.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento - MAPA. Altera o Anexo ao Decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, que aprova o Regulamento da Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, ou biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 14 de janeiro de 2004.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 518, de 25 de março de 2004. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 de março de 2004.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento - MAPA. Instrução Normativa nº 27, de 05 de junho de 2006. Dispõe sobre fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes para serem produzidos, importados ou comercializados, deverão atender aos limites estabelecidos nos Anexos I, II, III, IV e V desta Instrução Normativa no que se refere às concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados, pragas e ervas daninhas. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 9 de junho de 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução 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, e dá

outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 167, p. 141-146, 30 de agosto de 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 66, p. 64-68, 3 de abril de 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009. Define critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 249, p. 81-84, 28 de dezembro de 2009.

BRASIL. Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado do Rio de Janeiro – **PERS**. Relatório Síntese. Rio de Janeiro. 138 p. 2013. Disponível em: <[http://www.rj.gov.br/c/document\\_library/get\\_file?uuid=65e25795-833b-4eef-acb2-9d29da85b1c6&groupId=132946](http://www.rj.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=65e25795-833b-4eef-acb2-9d29da85b1c6&groupId=132946)>. Acesso em: 14 de agosto de 2016.

CAMARGO, O. A. **Reações e interações de micronutrientes no solo**. 2006. Artigo em Hypertexto. Disponível em: <[http://www.infobibos.com/Artigos/2006\\_3/micronutrientes/Index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2006_3/micronutrientes/Index.htm)>. Acesso em: 18 de abril de 2017.

CANELLAS, L.P.; SANTOS, G. A.; AMARAL, N. M. B. Reações da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999, p.69-90.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2001-2003**. São Paulo, 2005.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo: 2006**. São Paulo, 2007.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ - SANEPAR. **Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura**. Curitiba. Sanepar, 1999, 98 p.

CORREA, R. S.; WHITE, R. E.; WEATHERLEY; A. J. Risk of nitrate leaching from two soils amended with biosolids. **Water Resources**, v. 33, n. 4, p. 453-462, 2006.

COSTA, C. N. **Biodisponibilidade de metais pesados em solos do Rio Grande do Sul**. 2005. 110 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

COSTA, A. L.; LIMA, J. M.; NETO, M. R.; SILVA, C. A.; CANNATA, M. G. Lixiviação de

nitrogênio e fósforo em solos tratados com lodo de esgoto e água residuária de suinocultura. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 57, n. 4, p. 396-406, 2014.

DELARMELINA, W. M.; CALDEIRA, M. V. W.; FARIA, J. C. T.; GONÇALVES, E. O.; ROCHA, R. L. F. Diferentes Substratos para a Produção de Mudas de *Sesbania virgata*. **Floresta e Ambiente**, v. 21, n. 2, p. 224-233, 2014.

FARIA, L. C. **Uso do lodo de esgoto (biossólido) como fertilizante em eucaliptos: demanda potencial, produção e crescimento das árvores e viabilidade econômica**. 2007. 105 f. Tese (Doutorado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FJÄLLBORG, B.; AHLBERG, G.; NILSSON, E.; DAVE, G. Identification of metal toxicity in sewage sludge leachate. **Environment International**, Elmsford, v. 31, n. 1, p. 25-31, 2005.

FONSECA, R. W. S. **Caracterização do solo e relação com o crescimento inicial de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, em Queimados – RJ**. 2010. 25 f. Monografia (Curso de Engenharia Florestal). Insituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

FREITAS, E. V. S., NACIMENTO, C. W. A.; GOULART, D. F.; SILVA, J. P. S. Disponibilidade de cádmio e chumbo para milho em solos adubados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1899-1907, 2009.

GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; COSTA, L. M.; MENDONÇA, E. S. Extração fracionada de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 4, p. 543-551, 1997.

GONÇALVES, J. L. M.; SANTARELLI, E. G.; MORAES NETO, S. P.; MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V. (Eds.) **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 309-350.

GUEDES, M. C.; ANDRADE, C. A.; POGGIANI, F.; MATTIAZZO, M. E. Propriedades químicas do solo e nutrição do eucalipto em função da aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p.267-280, 2006.

HAYNES, R. J. Lime and phosphate in the soil plant system. **Advances in Agronomy**, Newark, v. 37, p. 249 -315, 1984.

HOODA, S. P. Trace elements in soils. London: Wiley, 2010. 618 p. In: RIBEIRO DO VALLE, L. A. **Avaliação de elementos-traço em fertilizantes e corretivos**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

INMET - **INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA**. Precipitação diária, Seropédica, RJ. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em de 15 junho de 2016.

KABATA-PENDIAS, A. Trace elements in soils and plants. 4<sup>th</sup> ed. Boca Raton: CRC, 2011. 534 p. In: RIBEIRO DO VALLE, L. A. **Avaliação de elementos-traço em fertilizantes e corretivos**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

KHAI, N. M. Effects of using wastewater and biosolids as nutrient sources on accumulation and behavior of trace metals in Vietnamese soils. 2007. 71p. Tese (Doutorado). Universidade Sueca de Ciências Agrícolas. 2007. Uppsala: 2007. In: PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; SOUSA, J. F.; PICKLER, A. C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. C. Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, n. 16, p. 89-188, 2010.

LAMBAIS, M. R. E CARMO, J. B. Impactos da aplicação de biossólidos na microbiota de solos tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 3, p.1129-1138, 2008.

LEMAINSK, J. E SILVA, J. E. Avaliação agronômica e econômica da aplicação de biossólido na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n. 10, p. 1477-1484, 2006.

LOGANATHAN, P.; HEDLEY, M. J.; GREGG, P. E. H.; CURRIE, L. D. Effect of phosphate fertilizer type on the accumulation and plant availability of cadmium in grassland soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystem**, v. 47, n. 3, p. 169-178, 1997.

MALAVOLTA, E. Fertilizantes e seu impacto ambiental: Micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificação e fatos. São Paulo, **Produquímica**, 1994. 153 p.

MAMO, M.; ROSEN, C. J.; HALBACH, T. R. Nitrogen availability and leaching from soil amended with municipal solid waste compost. **Journal of Environmental Quality**, v. 28, n. 4, p. 1074-1082, 1999.

MARQUES, M. O.; MELO, W. J.; MARQUES, T. A. Metais pesados e o uso de biossólidos na agricultura. In.: TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM, S. P.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, A. J.; MARQUES, M. O. (Eds.) **Biossólidos na Agricultura**. 1<sup>a</sup> Ed. São Paulo, SABESP, 2001. 468p.

MATOS, A. T. **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão dos metais zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do município de Viçosa – MG**. 1995. 110 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

MATTIAZZO-PREZOTTO, M. E. **Comportamento de Cu, Cd, Cr, Ni e Zn adicionados à solos de clima tropical em diferentes valores de pH**. 1994. 197 p. Tese (Livre Docência). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

MCBRIDE, M.B. Toxic metal accumulation from agricultural use of sludge: are USEPA regulations protective? **Journal of Environmental Quality**. Madison, v. 24, n. 1, p. 5-18, 1995.

MENESES, T. S. **Fauna, pesca e contaminação por metais pesados em pescado no litoral de Sergipe**. 2008. 115 f. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente). Universidade Tiradentes, Aracaju, 2008.

MOLLOY, R.; MCLAUGHLIN, M.; WARNE, M.; HAMON, R.; KOOKANA, R.; SAISON, C. **Background and scope for establishing a list of prohibited substances and guideline limits for levels of contaminants in fertilizers**. CSIRO Land and Water, Centre for Environmental Contaminants Research, Final scoping report, 2005.

MUNHOZ, R. O. E BERTON, R. S. Disponibilidade de fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto. In: BETTIOL, W. E CAMARGO, O. A. **Lodo de esgoto: Impactos ambientais na agricultura**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2006. 349 p.

NETO, S. P. M.; ABREU, J. R.; MURAOKA, T. **Uso de biossólido em plantios florestais**. Embrapa Informações Tecnológicas, Embrapa Cerrados, Planaltina, DF, v. 202, p. 1-16, 2007.

OLIVEIRA, F. C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 246 f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E.; MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O. Lixiviação de nitrato em um Latossolo Amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n. 1, p.171-180, 2001.

OLIVEIRA, F. C. E MATTIAZZO, M. E. Mobilidade de metais pesados em um Latossolo amarelo distrófico tratado com lodo de esgoto e cultivado com cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, n. 4, p. 807-812, 2001.

PASUELLO, A.; Mari, M.; Nadal, M.; Schuhmacher, M.; Domingo, J. L. POP accumulation in the food chain: integrated risk model for sewage sludge application in agricultural soils. **Environment International**, v. 36, n. 6, p. 577-583, 2010.

PASUELLO, A.; CADIACH, O.; PEREZ, Y.; SCHUHMACHER, M. A spatial multicriteria decision making tool to define the best agricultural areas for sewage sludge amendment. **Environment International**, v. 38, n. 1 p. 1-9. 2012.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T. E PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n.1, p.33-38, 1984.

PIRES, A. M. M. E MATTIAZZO, M. E. **Avaliação da Viabilidade do Uso de Resíduos na Agricultura**. Jaguariúna, SP, Embrapa, 2008. 9 p. (Circular Técnica, 19).

PRADO, R. M. E JULIATTI, M. A. Lixiviação de cádmio em profundidade em coluna com Latossolo vermelho e Nitossolo. **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 78, n. 2, 2003.

RAMALHO, J. F. G. P.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; VELLOSO, A. C. X. Contaminação da microbiota de caetés com metais pesados pelo uso de agroquímicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 7, p. 1289-1303, 2000.

REEVES, D. W. **The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems**. *Soil Tillage Research*, 43, p. 131-167, 1997.

REZENDE, C. I. O. **Influência da aplicação de lodo de esgoto (biossólido) sobre a concentração e o estoque de nutrientes na biomassa do sub-bosque, na serrapilheira e no solo de um talhão de *Eucalyptus grandis***. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agrossistemas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

RIBEIRO DO VALLE, L. A. **Avaliação de elementos-traço em fertilizantes e corretivos**. 2012. 78 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

ROBARDS, K. 1991. Cadmium: Toxicology and Analysis. **Analyst**, 116:549-568.

ROCHA, G. N.; GONÇALVES, J. L. M.; MOURA, I. M. Mudanças da fertilidade do solo e crescimento de um povoamento de *Eucalyptus grandis* fertilizado com biossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 623-639, 2004.

SANTOS, F. M. **Produção de Biomassa e Eficiência de Uso dos Nutrientes em Plantios Puros e Mistos de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mangium* Willd.** 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2015.

SHUMAN, L. M. Phosphorus and nitrate nitrogen in runoff following fertilizer application to turfgrass. *Journal of Environmental Quality*, v. 31, p. 1710-1715, 2002. In: LUCHESE, A. V.; COSTA, A. C. S.; SOUZA JÚNIOR, I. G. Lixiviação de íons após a aplicação de resíduos orgânicos de uma indústria farmoquímica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 189-199, 2008.

SIMÃO, J. B. P. E SIQUEIRA, J. O. Solos contaminados por metais pesados: características, implicações e remediações. **Recuperação de áreas degradadas**, Belo Horizonte, v. 22, n. 210, p. 18-26, 2001. (Informe Agropecuário).

SMITH, C. T. E CARNUS, J. M. Biosolids – planning and design. In.: *The forest alternative. Principles and practice of residuals use*. **International Symposium on the use of residuals as soil amendments in forest ecosystems**. Proceedings// Seattle: University of Washington, 1997. p. 45-52.

SOARES, M. R. **Coefficiente de distribuição (Kd) de metais pesados em solos do estado de São Paulo**. 2004. 202 p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. 2<sup>nd</sup> Edition. Amsterdam, Boston, Academic Press, 2003. 352 p.

SPOSITO, G. The chemistry of soils. 1.ed. Oxford: Oxford University Press, 1989, 277p.

SPOSITO, G.; MARTIN-NETO, L.; YANG, A. Atrazine complexation by soil humic acids. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 25, n. 6, p. 1203-1209, 1996.

SPOSITO, G. (2008) The chemistry of soils. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Oxford. 330p.

STEVENSON, F. J. Organic matter-micronutrient reactions in soil. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Eds.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 145-186.

STEVENSON, F. J. **Humus Chemistry: Genesis, composition, reactions**. 2<sup>nd</sup> Ed. New York: John Wiley, 1994. 496 p.

TAYLOR, R. W.; XIU, H.; MEHADI, A. A.; SHUFORD, J. W.; TADESSE, W. Fractionation of residual cadmium, copper, nickel, lead and zinc in previously sludge-amended soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 26, p. 2193-2204, 1995. In: BERTONCINI, E. I. E MATTIAZZO, M. E. Lixiviação de metais pesados em solos tratados com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 737-744, 1999.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Avaliação agrônômica de um biossólido industrial para a cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 261-269, 2005.

TRANNIN, I. C. B.; SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com biossólido industrial e cultivado com milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 223-230, 2008.

TRAZZI, P. A.; CALDEIRA, M. V. W.; REIS, E. F.; SILVA, A. G. Produção de mudas de *Tectona grandis* em substratos formulados com biossólido. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 2, p. 293-302, 2014.

USEPA. **Handbook, ground water**. EPA / 625 / 6-87 / 016. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1987.

VELASCO MOLINA, M. **Nitrogênio e metais pesados em Latossolo e eucalipto cinquenta e cinco meses após a aplicação de biossólidos**. 2004. 66 f. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

YSI incorporated, Operations Manual, YSI Model 63. USA, 1998.