

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 06/08/2020.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DINÂMICA DE ELEMENTOS TRAÇO EM LATOSSOLO
VERMELHO EUTROFÉRICO EM 20 ANOS DE APLICAÇÃO DE
LODO DE ESGOTO**

Danilo Olandino de Souza
Químico

2018

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DINÂMICA DE ELEMENTOS TRAÇO EM LATOSSOLO
VERMELHO EUTROFÉRICO EM 20 ANOS DE APLICAÇÃO DE
LODO DE ESGOTO**

**Danilo Olandino de Souza
Orientador: Prof. Dr. Wanderley José de Melo**

**Dissertação apresentada à
Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias – UNESP, Câmpus de
Jaboticabal, como parte das exigências
para obtenção do título de Mestre em
Agronomia (Ciência do Solo).**

S729d Souza, Danilo Olandino de
Dinâmica de elemento traço em Latossolo Vermelho
eutroférico em 20 anos de aplicação de lodo de esgoto /
Danilo Olandino de Souza. -- Jaboticabal, 2018
48 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Wanderley José de Melo

1. bio sólidos. 2. digestão de solo. 3. governança de
solo. 4. metais pesados. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca
da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados
fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

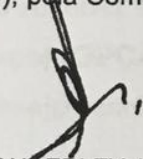
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: DINÂMICA DE ELEMENTOS-TRAÇO EM LATOSSOLO VERMELHO EUTROFÉRICO EM 20 ANOS DE APLICAÇÃO DE LODO DE ESGOTO

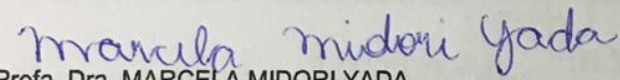
AUTOR: DANILO OLANDINO DE SOUZA

ORIENTADOR: WANDERLEY JOSÉ DE MELO

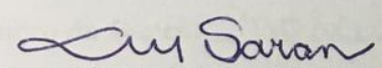
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. WANDERLEY JOSÉ DE MELO
Departamento de Tecnologia / FCAV/UNESP - Jaboticabal



Profa. Dra. MARCELA MIDORI YADA
Universidade Norte do Paraná-UNOPAR / Londrina/PR



Profa. Dra. LUCIANA MARIA SARAN
Departamento de Tecnologia / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 06 de agosto de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Danilo Olandino de Souza, nascido em Jaboticabal/SP, em 14 de julho de 1989, graduou-se bacharel em Química Tecnológica pelo Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos em 2014. De agosto de 2012 a fevereiro de 2013 realizou iniciação científica no centro universitário que se graduou. De agosto de 2012 a setembro de 2016 foi estagiário e aluno de iniciação científica no Laboratório de Biogeoquímica do departamento de tecnologia da FCAV- UNESP, participando de projetos relacionados ao uso e manejo de resíduos na agricultura. Ingressou no Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo), nível mestrado pela UNESP, Campus de Jaboticabal/SP em 2016, orientado pelo Prof. Dr. Wanderley José de Melo.

“Dedico este trabalho primeiramente a Deus que me deu forças para alcançar mais esta etapa da minha vida. Agradeço a minha noiva Magda e a minha mãe Maria pelo apoio, motivação e compreensão de vocês, que nos momentos de dificuldade em que nem eu acreditava em mim me mantiveram firme sendo a força para continuar na caminhada.

Combati um bom combate, completei minha

Agradeço primeiramente a Deus, Autor e Senhor de todas as coisas, que me fez capaz de desenvolver este trabalho, que sem sua infinita misericórdia e sabedoria a mim concedida eu nada poderia realizar.

Agradeço a minha heroína e guerreira, minha mamãe Maria, com a certeza de que só estou aqui nesta caminhada porque a senhora sempre me deu o suporte que eu necessitava, te amo incondicionalmente e muitas vezes só continuei por sua causa, pois cada sucesso que alcancei, cada passo que dei a felicidade expressa em seu rosto me fez valer cada momento.

Agradeço a minha companheira, amiga e amor da minha vida, Magda pelo apoio, carinho e por estar sempre presente me ajudando e dando forças em todas as minhas escolhas, sei que não foi fácil à caminhada e ainda não é fácil, mas a vitória vem para aqueles que lutam e quero te ter a vida toda ao meu lado.

Agradeço a minha família que sempre esteve ao meu lado torcendo por mim: José, Adriano, Sebastião, João, Piercarlo, Ana e todos os outros que se fizeram presente em minha vida e jornada.

Agradeço ao meu orientador Prof. Wanderley pelo suporte e apoio para realizar este trabalho, que mesmo com as adversidades sempre se fez presente e o possível para me manter no caminho.

Agradeço a Professora Mara que sem a sua ajuda este trabalho não teria sido realizado, com o coração enorme de mãe que abraça todos que necessitam de uma “ajudinha”, só Deus nosso Pai pode retribuir o que a senhora fez por mim. Obrigado por tudo.

Agradeço de coração a todos os meus amigos que com conversas de descontração, conhecimento compartilhado, amizade, carinho, “às vezes umas briguinhas” que sem isso este tempo seria um fardo enorme: Denise (obrigado por tudo), Elienai, Fernando, Letícia, Gresicy, Suelen, Rivi, Caio (obrigado pelos conhecimentos e momentos compartilhados), Roberta (obrigado pelas ranhéticas e pelo carinho que tem por mim), Jean, Juninho, Bel, Ju, Denis (obrigado pela amizade). E todos aqueles que colaboraram de alguma forma.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

RESUMO	iii
ABSTRACT	Erro! Indicador não definido.
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Lodo de esgoto e o uso na agricultura	3
2.2 Latossolos – Mineralogia	5
2.3 Elementos traços	6
2.4 Legislação	7
2.5 Cromo	9
2.6 Chumbo	10
2.7 Métodos de extração.....	12
3 HIPÓTESE E OBJETIVOS	13
4 MATERIAL E MÉTODOS	14
4.1 Histórico da área experimental.....	14
4.2 Instalação e condução do experimento.....	16
4.3 Análises Químicas	23
4.3.1 Cr e Pb disponível	23
4.3.2 Cr e Pb Pseudo total - digestão USEPA 3050b.....	23
4.3.3 Cr e Pb total - Digestão fluorídrica.....	24
4.4 Cr na planta inteira e nos grãos de milho.....	24
4.5 Determinação do teor de Cr e Pb.....	24
4.6 Estatística.....	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
5.1 Métodos de extração.....	25
5.2 Digestões	27

5.2.1 Método 3050b USEPA (Cromo e Chumbo pseudo total)	27
5.2.2 Método de Jackson (Cromo e Chumbo total)	30
5.3 Correlação entre os métodos	33
5.4 Cromo na planta.....	35
6 CONCLUSÕES	36
7 REFERÊNCIAS.....	36

DINÂMICA DE ELEMENTOS TRAÇO EM LATOSSOLO VERMELHO EUTROFÉRICO EM 20 ANOS DE APLICAÇÃO DE LODO DE ESGOTO

RESUMO – O lodo de esgoto (LE) tem sido usado em muitos países em substituição parcial aos fertilizantes minerais. Em regiões de clima tropical a falta de estudos quanto ao comportamento dos metais pesados no solo ao longo do tempo tem limitado seu uso. O objetivo do trabalho foi avaliar os métodos de extração: Mehlich-1, USEPA 3050b e método de Jackson, quanto sua disponibilidade em função da aplicação de lodo e acúmulo dos teores de Cromo (Cr) e Chumbo (Pb) no solo. Verificou-se que, mesmo com aplicação de altas doses de Cr via LE a disponibilidade do Cr é baixa, e tem mais influência do tempo que do acréscimo do metal. O método de digestão da USEPA 3050b não apresentou sensibilidade para diferenciar o balanço do Cr em função dos tratamentos. Para extração do Cr em Latossolos de regiões de clima tropical a digestão fluorídrica juntamente com o extrator Mehlich-1 são os mais recomendados para a extração. Para o Pb o método de extração da USEPA 3050b, demonstrou de forma eficiente a diferença nos teores e no acúmulo de Pb nos diferentes tratamentos. O acréscimo de Cr e Pb via LE não influenciaram as culturas, não sendo identificados valores fitotóxicos nas plantas, nem acúmulo de Cr e Pb no grão.

Palavras chave: bioossólidos, digestão de solo, governança de solo, metais pesados

DYNAMICS OF ELEMENTS TRACE IN OXISOIL IN 20 YEARS OF APPLICATION OF SEWAGE SLUDGE

SUMMARY - Sewage sludge (LE) has been used in many countries as a partial replacement for mineral fertilizers. In regions of tropical climate the lack of studies on the behavior of heavy metals in the soil over time has limited its use. The objective of this work was to evaluate the extraction methods: Mehlich-1, USEPA 3050b and Jackson method, as well as its availability as a function of sludge application and accumulation of Chromium (Cr) and Lead (Pb) levels in the soil. It has been found that even with high doses of Cr via LE the availability of Cr is low, and has more time influence than the addition of the metal. The USEPA 3050b digestion method showed no sensitivity to differentiate the Cr balance depending on the treatments. For extraction of Cr in Latosols of regions of tropical climate the fluoride digestion together with Mehlich-1 extractor are the most recommended for the extraction. For Pb, the USEPA 3050b extraction method efficiently demonstrated the difference in Pb levels and accumulation in the different treatments. The addition of Cr and Pb via LE did not influence the cultures, neither phytotoxic values were identified in the plants nor Cr and Pb accumulation in the grain.

Keywords: biosolids, soil digestion, soil governance, heavy metals.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Teores máximos aceitáveis e carga teórica acumulada de metais pesados presentes no lodo de esgoto para uso na agricultura.....	08
Tabela 2. Valores orientadores de metais pesados para solo de acordo com a resolução 420 CONAMA (2009) e CETESB (2014).	08
Tabela 3. Teores de Cr em lodo de esgoto de diversas localidades.....	09
Tabela 4. Teores de Pb em lodo de esgoto de diversas localidades.....	12
Tabela 5. Doses de lodo de esgoto, cultura, origem do lodo e concentração de Cr no lodo de esgoto aplicadas.....	16
Tabela 6. Análise química do solo antes do início do ano agrícola.....	18
Tabela 7. Doses de fertilizante mineral aplicado durante o experimento.....	20
Tabela 8. Correlação entre as frações de Cr e Pb disponível no solo e de diferentes extrações.....	34
Tabela 9. Teor de Cr e Pb na Planta.	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fontes de chumbo no ambiente	11
Figura 2. Local do experimento.	17
Figura 3. Fontes de chumbo no ambiente	19
Figura 4. Aplicação do LE.....	19
Figura 5. Plantio e fertilização mineral do tratamento controle	20
Figura 6. Teor de Cromo disponível pelo método Mehlich-1, em Latossolo que recebeu lodo de esgoto por vinte anos.....	26
Figura 7. Teor de pseudo –total (Cr) em Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto por vinte anos, obtido pelo método de digestão USEPA 3050b (HNO ₃ + H ₂ O ₂ + HCl).....	28
Figura 8. Teor de Pb em Latossolo Vermelho eutroférico tratado lodo de esgoto por vinte anos, obtido pelo método digestão HNO ₃ + H ₂ O ₂ + HCl.	29
Figura 9. Teor total de Cromo, pelo método de digestão fluorídrica, em Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto por vinte anos.	30
Figura 10. Teor total de Pb em Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto por vinte anos, obtido pelo método digestão fluorídrica.....	32

1 INTRODUÇÃO

Os solos brasileiros em sua grande maioria, principalmente Latossolos, são solos ácidos e pobres em nutrientes (especialmente fósforo e micronutrientes), isso se dá por serem solos velhos que sofreram ação de intemperismo por muito tempo, a tal ponto que praticamente não existem nos solos minerais 2:1, que trazem fertilidade para o solo, necessitando de grandes quantidades de corretivos e fertilizantes, que elevam o custo de produção. Uma alternativa para diminuir o custo de produção é a utilização de fertilizantes orgânicos, como o lodo de esgoto (LE), que pode substituir parcialmente fertilizantes minerais (Melo et al., 2007; Siebielec et al., 2018; Melo et al., 2018).

O lodo de esgoto (LE) possui em sua composição teores elevados de material orgânico, macronutrientes (nitrogênio e fósforo) e micronutrientes (zinco, cobre, ferro, manganês e molibdênio) (Pires e Matiazzo, 2008; Yuan et al., 2016), que se incorporados ao solo trazem benefícios como o aumento da permeabilidade, porosidade e estabilidade dos agregados do solo. Para as plantas, a aplicação do lodo ao solo promove aumento da biomassa e um aumento significativo da produção agrícola (Melo et al., 2007; Singh e Agrawal, 2010).

Apesar dos diversos benefícios que a aplicação de lodo de esgoto promove ao solo, sua composição apresenta também microrganismos patogênicos e teores significativos de metais pesados que se manejados inadequadamente, podem causar contaminação e influenciar negativamente nos processos biológicos do solo, como atividade enzimática, população microbiana e a respiração basal (Fang et al., 2016).

A utilização de lodo de esgoto na agricultura, em condições tropicais não é uma prática ainda muito difundida pelos produtores rurais. Os diversos fatores que contribuem para um menor índice da utilização do lodo de esgoto como fertilizante orgânico, são os limites e critérios definidos na resolução do CONAMA nº 375 dos teores de metais pesados para o uso de lodo de esgoto em solos agrícolas no Brasil (CONAMA, 2006).

Os métodos de extração, bem como os valores de referência para limites de metais pesados, tanto no lodo de esgoto como no solo, são baseados, principalmente, na legislação americana e na europeia (USEPA, 1997; CEE, 1996), sendo os estudos

embasaram estas legislações desenvolvidos em condições de clima e tipos de solo diferentes dos existentes no Brasil.

O monitoramento dos níveis de metais pesados no solo em áreas tratadas com LE é fundamental para avaliar sua qualidade, e evitar a contaminação em nível trófico. Para alcançar êxito no monitoramento da qualidade do solo, a escolha do método de análise que melhor represente a disponibilidade do metal pesado do solo é primordial. A metodologia deve ser adaptada às condições locais e permitir o uso de alternativas de adubação que viabilizem a exploração agrícola do solo, fornecendo resultados sólidos quanto a contaminação do ambiente e a transferência destes elementos para a cadeia alimentar (Pires e Matiazzo, 2008).

Os Latossolos são os solos que cobrem a maior área agrícola do Brasil e tem como propriedades alto grau de intemperismo, baixa fertilidade natural, ricos em silicatos, óxidos de ferro, alumínio e manganês (Marques et al., 2004; Ajayi et al., 2009). Estas características do solo contribuem para maior adsorção e complexação de elementos como fósforo e metais pesados, tornando-os menos disponíveis às plantas (Reis et al., 2014). Dentre os metais pesados, o Cromo (Cr) e o Chumbo (Pb) se destacam por apresentarem concentrações baixas nos Latossolos e presença generalizada nos lodos de esgoto (Pierzynski et al., 1994). O Cr apresenta como peculiaridade ser essencial aos microrganismos, mas não apresentam essencialidade comprovada às plantas (Fijalkowski et al., 2017; Minari et al., 2017). Já o Pb é tóxico e pode causar distúrbios nos processos fisiológicos das plantas atrapalhando as atividades metabólicas e podendo causar estresse oxidativo.

Nos solos tropicais o Cr se apresenta geralmente na sua forma trivalente Cr^{3+} com baixa mobilidade, solubilidade e, como a maioria dos metais pesados, está predominante ligado à matéria orgânica, óxidos e silicatos. Por estas características, o método de extração USEPA 3050 e 3051 dos metais pesados proposto pela CONAMA (2006), talvez não seja o mais adequado para a extração do Cr em solos tropicais que receberam lodo de esgoto, por conta dos altos teores de silicatos que o solo brasileiro apresenta característica esta uma das que os diferencia dos solos de clima temperado.

De acordo com Abreu et al. (2001), no Brasil, ainda não existe um procedimento definido pela pesquisa para avaliar a disponibilidade de metais pesados para avaliar

potencialmente elementos tóxicos como o Níquel (Ni) e Cobre (Cu) (MANTOVANI et al., 2004).

O Pb é um dos poluentes tóxicos mais encontrados no ambiente, proveniente das rochas na formação do solo e de processos industriais como a mineração e queima de combustíveis fósseis. Uma das características que o Pb apresenta é a persistência e baixa mobilidade no solo o que permite encontrar altos níveis do elemento em solos urbanos e agrícolas.

Atualmente, o método de extração de metais pesados em solos tropicais que recebem aplicação de lodo de esgoto, consiste em digestão segundo o método da USEPA 3050b, no qual as amostras de solo são digeridas em ácido nítrico, posterior adição de peróxido de hidrogênio (a fim de degradar a matéria orgânica) e por fim adição de ácido clorídrico (USEPA, 2014).

Embora este método seja adotado por diversos países de clima tropical, principalmente em Latossolos, ele tem limitado a capacidade de extração de metais, pois, esse tipo de digestão não é capaz de digerir a fração sílica do solo, por consequência, não quantifica os metais ligados a esta fração (Alsaleh et al., 2018), em condições tropicais cerca de 50% do teor de metais pesados, está ligado as frações silicatadas (Nogueira et al., 2008), tornando o estudo dos teores e disponibilidade destes metais pesados ligados a esta fração, significativos e necessários.

6 CONCLUSÕES

O método de digestão da USEPA 3050b não apresentou eficiência em quantificar Cr em Latossolo, nem se correlacionou com a fração disponível do elemento, mostrando-se ineficiente para a extração.

A digestão fluorídrica juntamente com o extrator Mehlich-1 foi mais eficiente para a extração do Cr no solo.

Para Pb, o método 3050b da USEPA mostra-se eficiente ao diferenciar os tratamentos e acúmulo no solo proveniente da aplicação de LE, porém, não determina a concentração de Pb ligada a fração sílica do solo, e deste modo o método é inadequado para a extração de Pb no solo.

Mesmo após 20 anos de aplicações anuais de LE, o teor total de Pb e Cr no solo estão abaixo dos teores determinados pela legislação, fator este relevante e que reforça a viabilidade do uso e manejo do resíduo com segurança em áreas agrícolas.

Mediante os teores de Cr e Pb nas plantas, o LE pode ser utilizado como fertilizante orgânico, substituindo parcialmente a fertilização mineral em áreas agrícolas de regiões tropicais, sem causar acúmulo no grão e atingir teores fitotóxicos para as plantas.

7 REFERÊNCIAS

Abreu CA, Abreu MF, Andrade, JC. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo, níquel e chumbo em solos usando a solução de DTPA em pH 7,3. In: Raij B van, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA (Ed.). **Análise química para**

avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. p.240-250.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 10.007 (2004) **Resíduos Sólidos - Amostragem de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, p. 21.

Achilli M, Barban R, Zucchi B, Martinotti W (1991) Elemental analysis of solid samples by low temperature plasma ashing and microwave acid digestion. **Water Air Soil Pollut** 57: 495-503.

Afzal M, Khan QW, Sessitsch A (2014) Endophytic bacteria: prospects and applications for the phytoremediation of organic pollutants. **Chemosphere.** 117:232–242. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.078>.

Ajayi AE, Junior MDSD, Curi N, Gontijo I, Araujo-Junior CF, Júnior, AIV (2009) Relation of strength and mineralogical attributes in Brazilian latosols. **Soil and Tillage Research**, 102: 14-18.

Ali H, Khan E, Sajad MA (2013). Phytoremediation of heavy metals—concepts and applications. **Chemosphere**, 7:869–881.

Alloway BJ (1990) Heavy metals in soils. **New York. John Wiley & Sons**, 339p.

Alsaleh KAM, Meuser H, Usman, ARA, Al-wabel MI, Al-farraaj AS (2018) A comparison of two digestion methods for assessing heavy metals level in urban soils influenced by mining and industrial activities. **Journal of Environmental Management**, 206: 731-739.

Andrade AFM, Amaral Sobrinho NMB, Magalhães MOL, Nascimento VS, Mazu N (2008) Zinco, chumbo e cádmio em plantas de arroz (*Oryza Sativa* L.) cultivadas em solo após adição de resíduo siderúrgico. **Ciência Rural**, 38:1877-1885.

Arenas Lago D, Andrade ML, Lago Vila M, Rodríguez Seijo A, Vega FA (2014) Sequential extraction of heavy metals in soils from a copper mine: distribution in geochemical fractions. **Geoderma**, 230:108-118.

Azzi V, Kazpard V, Lartiges B, Kobeissi A, Kanso A, El Samrani AG (2017). Trace metals in phosphate fertilizers used in Eastern Mediterranean countries. **CLEAN–Soil, Air, Water**, 45(1).

Backes C, Lima CP, Fernandes DM, Godoy LJG, Kiihl TAM, Villas Bôas RL (2009) Efeito do lodo de esgoto e nitrogênio na nutrição e desenvolvimento inicial da mamoneira. **Bioscience Journal**, 25: 90-98.

Bai Y, Zang C, Gu M, Gu C, Shao H, Guan Y, Wang X, Zhou X, Shan Y, Feng K (2017) Sewage sludge as an initial fertility driver for rapid improvement of mudflat salt-soils. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, 578: 47-55.

Bairq ZAS, Li R, Li Y, Gao H, Sema T, Teng W, Liang Z (2018) New advancement perspectives of chloride additives on enhanced heavy metals removal and phosphorus fixation during thermal processing of sewage sludge. **Journal of Cleaner Production**, 188: 185-194.

Bataglia OC, Raj BV (1989) Eficiência de extratores de micronutrientes na análise de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 13: 205.

Bento AP, Sezerino PH, Philippi LS, Reginatto V, Lapolli FR. Caracterização da microfauna em estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados: um instrumento de avaliação e controle do processo. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, 10: 329-338.

Bovi MLA, Godoy Júnior G, Costa EAD, Berton RS, Spiering SH, Vega FVA, Cembranelli MAR, Maldonado CAB (2007) Lodo de esgoto e produção de palmito em pupunheira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31: 153-166.

Cai QY, Mo CH, Wu QT, Zeng QY, Katsoyiannis A (2007) Concentration and speciation of heavy metals in six different sewage sludge-composts. **Journal of Hazardous Materials**, 147: 1063–1072.

Camilotti F, Marques MO, Andrioli I, Silva AR, Tasso Junior LC, Nobile FO (2007) Acúmulo de metais pesados em cana-de-açúcar mediante a aplicação de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, 27: 284-293.

CANADIAN MINISTRY OF THE ENVIRONMENT- CME (2009) **Soil, Ground Water and Sediment Standards for Use under Part XV**. of the Environmental Protection Act. <https://dr6j45jk9xcmk.cloudfront.net/documents/998/3-6-3-sediment-standards-en.pdf>

Carneiro C, Sotomaior AP, Andreoli CV (2005) Dinâmica de nitrogênio em lodo de esgoto sob condições de estocagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29: 987-994.

Castilho DD, Guadagnin CA, Silva MD, Leitzke VW, Ferreira LH, Nunes MC (2001) Acúmulo de cromo e seus efeitos na fixação biológica de nitrogênio e absorção de nutrientes em soja. **Revista Brasileira de Agrociência**, 7:121-124.

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (1999) **Critérios para avaliação de biossólidos em áreas agrícolas: critérios para projeto e aplicação: norma P 4.230**. São Paulo, p. 32 (Manual Técnico).

CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (2014) **Decisão de Diretoria 045/2014/E/C/I, de 20-02-2014. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2014, em substituição aos Valores Orientadores de 2005 e dá outras providências**. Diário Oficial do Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 124 (26).

Chu S, Wu D, Liang LL, Zhong F, Hu Y, Hu X, Lai C, Zeng S (2017) Municipal sewage sludge compost promotes *Mangifera persiciforma* tree growth with no risk of heavy metal contamination of soil. **Scientific Reports** 7.

CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2006) **Resolução nº 375 Critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados**. Diário Oficial da União, Brasília, 146p. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>> (Acessado em 28.05.2017).

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (2009) **Resolução 420, 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**. Brasília.

Cordell D, Neset TSS (2014) Phosphorus vulnerability: A qualitative framework for assessing the vulnerability of national and regional food systems to the multi-dimensional stressors of phosphorus scarcity. **Global Environmental Change** v. 24, p. 108-122. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2013.11.005.

Cornu S, Neal C, Ambrosi JP, Whitehead P, Neal M, Sigolo J, Vachier P (2001) The environmental impact of heavy metals from sewage sludge in ferralsols (São Paulo, Brazil). **Science of The Total Environment**, 3: 27-48.

Costa LM (2002) Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2: 103-142.

Costa NC, Meurer EJ, Bissani CA, Selbach PA (2006) Contaminantes do solo e o meio ambiente. In **Fundamentos de Química do Solo**. 3a ed. Porto Alegre: Evangraf, 2006, p.285.

Cunha KPV, Nascimento CWA, Pimentel RM, Accioly AMA, Silva AJ (2008) Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, 32: 1319-1328.

Cunha FG, Machado GJ (2004) Estudos de geoquímica ambiental e o impacto na saúde pública no município de São Gonçalo do Piauí, estado do Piauí. Programa Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia Médica "PGAGEM". CPRM – **Serviço Geológico do Brasil**. p. 37. Disponível em:<http://www.cprm.gov.br/gestao/estudo_geoq_amb.pdf>. Acesso em 24 junho de 2018.

DAS COMUNIDADES EUROPÉIAS, CEE–Conselho. Diretiva do conselho de 12 de junho de 1986 relativa à proteção do meio ambiente, e em especial dos solos, na utilização agrícola de lamas de depuração (86/278/CEE). **Jornal Oficial das Comunidades Européias**, 181:1996.

Diaz E, Roldan A, Lax A, Albaladejo J (1994) Formation of stable aggregates in degraded soil by amendment with urban refuse and peat. **Geoderma**, 63: 277-288.

Du YJ, Wei ML, Reddy KR, Liu ZP, Jin F (2014) Effect of acid rain pH on leaching behavior of cement stabilized lead-contaminated soil. **Journal of Hazardous Materials**, 271:131-140.

El Fels L, Zamama M, El Asli A, Hafidi M (2014) Assessment of biotransformation of organic matter during co-composting of sewage sludge-lignocelulosic waste by chemical, FTIR analyses, and phytotoxicity tests. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 87: 128-137.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (2013) **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3 ed. Brasília: Embrapa, p. 363.

ENVIRONMENT PROTECTION AUTHORITY OF AUSTRALIA- EPAA (2012) **Classification and management of contaminated soil for disposal. Information Bulletin 105**. Hobart, TAS 7001 Australia. http://epa.tas.gov.au/documents/ib105_classification_and_management_of_contaminated_soil_2012.pdf

Fang W, Wei Y, Liu J, Kosson DS, Van Der Sloot HA, Zhang P (2016) Effects of aerobic and anaerobic biological processes on leaching of heavy metals from soil amended with sewage sludge compost. **Waste management**, 58: 324-334.

Fijalkowski K, Rorat A, Grobelak A, Kacprzak MJ (2017) The presence of contaminations in sewage sludge–The current situation. **Journal of environmental management**, 203: 1126-1136.

Frišták V, Pipíška M, Soja G (2018) Pyrolysis treatment of sewage sludge: A promising way to produce phosphorus fertilizer. **Journal of Cleaner Production**, 172: 1772-1778.

Gondek K, Mierzwa Hersztek ME, Kopec M (2018) Mobilidade de metais pesados em solos arenosos após a aplicação de compostos produzidos a partir de palha de milho, lodo de esgoto e biocarvão. **Journal of environmental management**, 210: 87-95.

Gonçalves Júnior AC (2013) Descontaminação e monitoramento de águas e solos na região amazônica utilizando materiais adsorventes alternativos, visando remoção de metais pesados tóxicos e pesticidas. **Inclusão Social**, 6:2.

Gomes SBV, Nascimento CWA, Biondi CM (2007) Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 11: 459-465.

Grotto D, Gerenutti M, Souza VCO, Barbosa Jr F (2015) Deficiency of macro-and micronutrients induced by *Lentinula edodes*. **Toxicology reports**, 2:401-404.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2017) **Estimativas da população residente para os municípios e para as unidades da federação brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2017**. Brasília, DF: Ministério

do Planejamento, Orçamento e Gestão; 2017 [Acesso em 14/07/2018]. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv100923.pdf>.

Ignatowicz K (2017) The impact of sewage sludge treatment on the content of selected heavy metals and their fractions. **Environmental research**, 156: 19-22.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1981) **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo, escala 1:500.000. Mapa.

Jaishankar M, Tseten T, Anbalagan N, Mathew BB, Beeregowda KN (2014) Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. **Interdisciplinary toxicology**, 7: 60-72.

Jorge RF, Corá JE, Barbosa JC (2010) Número mínimo de tensões para determinação da curva característica de retenção de água de um Latossolo Vermelho eutrófico sob sistema de semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, p. 1831-1840.

Kabata-Pendias A, Pendias H (2001) **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 3 ed, p. 413.

Kabata-Pendias A, Pendias H (2010) **Trace Elements in Soils and Plants**. Boca Raton: CRC Press, 4 ed.

Kwiatkowska-Malina J (2018) Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. **Applied Soil Ecology**. 123:542-545.

Latore AM, Kumar O, Singh SK, Gupta A (2014) Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice–wheat system. **Ecological Engineering**, 69: 17-24.

Liang X, Kierans M, Ceci A, Hillier S, Gadd GM (2016) Phosphatase-mediated bioprecipitation of lead by soil fungi. **Environmental microbiology**, 18: 219-231.

Liu LN, Chen HS, Cai P, Liang W, Huang QY (2008) Immobilization and phytotoxicity of Cd in contaminated soil amended with chicken manure compost. **Journal of Hazardous Materials**, 163:563-567.

Lloret E, Pascual JA, Brodie EL, Bouskill NJ, Insam H, Juárez MFD, Goberna M (2016) Sewage sludge addition modifies soil microbial communities and plant performance depending on the sludge stabilization process. **Applied Soil Ecology**. 101: 37-46.

Lobo TF, Grassi Filho H (2007) Níveis de lodo de esgoto na produtividade do girassol. **Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal**, 7: 16-25.

Lu A, Zhang S, Shan X (2005) Time effect on the fractionation of heavy metals in soils. **Geoderma**, 125:225-234.

Lukowski A (2017) Fractionation of heavy metals (Pb, Cr and Cd) in municipal sewage sluges from podlasie province. **Journal of Ecological Engineering** 18:132-138.

Macedo FG, Melo WJ, Merlino LCS, Hernandes MR, Melo GMP, Camacho MA (2012) Acúmulo e disponibilidade de cromo, cádmio e chumbo em solos tratados com lodo de esgoto por onze anos consecutivos. **Semina-ciencias Agrarias**. 33:101-113.

Mantovani JR, Cruz MCPD, Ferreira ME, Alves WL (2004) Extratores para avaliação da disponibilidade de metais pesados em solos adubados com vermicomposto de lixo urbano. **Pesquisa agropecuária brasileira**, 39: 371-378.

Marques JJGSM, Curi N, Schulze DG (2002) Trace elements in Cerrado soils. In: Alvarez VVH, Schaefer CEGR, Barros NF, Mello JWV, Costa LM (Eds.). **Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2: 103-142.

Marques JJ, Schulze DG, Curi N, Mertzman SA (2004) Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, 119: 179-195.

Martín MA, Gutiérrez MC, Dios M, Siles JA, Chica AF (2018) Application of ATAD technology for digesting sewage sludge in small towns: Operation and costs. **Journal of environmental management**, 215:185-194.

Matos AT (1995) **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão dos metais zinco, cádmio, cobre e chumbo em solos do município de Viçosa – MG**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 110p. (Tese de doutorado).

Marrugo-Negrete J, Durango-Hernández J, Pinelo-Hernández J, Montes GE, Díez S. (2016). Mercury uptake and effects on growth in *Jatropha curca*. **Environmental Science Journal**, 48: 120-125,

McBride M (1994) Environmental chemistry of soils. **Oxford University Press**, Inc. 1, p. 406.

McLaughlin MJ (2001) Ageing of metals in soils changes bioavailability, **Environ. Risk Assess.**, 4:1-6.

Mehlich A (1953) **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄**. Mimeo North Carolina Soil Test Division: Raleigh, NC.

Melo TM, Bottlinger M, Schulz E, Leandro WM, Aguiar Filho AM, Wang H, Ok YS, Rinklebe J (2018) Plant and soil responses to hydrothermally converted sewage sludge (sewchar). **Chemosphere**.

Melo WJ, Aguiar PS, Melo GMP, Melo VP (2007) Nickel in a tropical soil treated with sewage sludge and cropped with maize in a long-term field study. **Soil Biology and Biochemistry**, 39:1341-1347.

Melo WJ, Melo GMP, Araujo ASF, Melo VP (2010) Avaliação da atividade enzimática em amostras de solo. In: Figueiredo MBV, Burity HA, Oliveira JP, Santos CERS, Stanford NP. Biotecnologia aplicada à agricultura: textos de apoio e protocolos experimentais. 1.ed. Brasília, Recife: **Embrapa Informação Tecnológica, Instituto Agrônomo de Pernambuco**, p. 153-187.

Merlino LCS, Melo WJ, Macedo FG, Guedes ACTP, Ribeiro MH, Melo VP, Melo GMP (2010) Bário, cádmio, cromo e chumbo em plantas de milho e em Latossolo após onze aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 34: 2031-2039.

Mertz W (1993) Chromium in human nutrition: a review. **Journal Nutrition**, v.123, p.626-633.

Minari GD, Rosalen DL, Cruz MCPD, Melo WJ, Alves LMC, Saran LM (2017) Agricultural management of an Oxisol affects accumulation of heavy metals. **Chemosphere**, 185: 344-350.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2017. **O Bioma Cerrado**. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/biomas/cerrado>> (Acesso em 26 de dezembro de 2017).

Jackson, ML, 1958. Soil chemical analysis, Prentice Hall, New York, pp. 498.

Morgano MT, Leibold H, Richter F, Stapf D, Seifert H (2017) Screw pyrolysis technology for sewage sludge treatment. *Waste Management*, 73:487-495.

Nascimento CD, Barros DAS, Melo ED, Oliveira AD (2004) Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28:385-392.

Negrete JM, Hernández JH, Díez S (2017) Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia, **Environmental Research** 154:380-388.

Nogueira TAR, Melo WJ, Nogueira TAR, Fonseca IM, Marques MO, He ZI (2010) Barium uptake by maize plants as affected by sewage sludge in a long-term field study. **Journal of Hazardous Materials** 181:1148-1157.

Nogueira TAR, Oliveira LR, Melo WJ, Fonseca IM, Melo GMP, Melo VP, Marques MO (2008) Cádmio, cromo, chumbo e zinco em plantas de milho e em latossolo após nove aplicações anuais de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 2195-2207.

Oliver I, Mclaughlin MJ, Merrington G (2005) Temporal trends of total potentially available element concentrations in sewage biosolids: a comparasion of biosolid surveys conducted 18 years apart. **Science of The Total Environment** 337:139-145.

Oliveira LR (2008) **Metais pesados e atividade enzimática em Latossolos tratados com lodo de esgoto e cultivados com milho**. 108f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

Oliveira MLJ, Araújo ASF, Melo WJ (2015) Chromium in soil organic matter and cowpea after four consecutive annual applications of composted tannery sludge. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 39: 297-302.

Pierzynski GM, Sims JT, Vance GF (1994) **Soils and environmental quality**. Boca Raton: Lewis, 313p.

Pires AMM, Mattiazzo ME (2008) **Avaliação da Viabilidade do Uso de Resíduos na Agricultura**. (EMBRAPA Jaguariúna. Circular Técnica 19. ISSN 1516-4683).

Raij B. van (1991) **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafos, 343 p.

Raij B.Van, Cantarella H (1997) Milho. In: Raij, B.van; Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC (Eds.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 56-59 p. (Boletim Técnico, 100).

Ramanathan T, Ting YP (2015) Selection of wet digestion methods for metal quantification in hazardous solid wastes **J. Environ. Chem. Eng** 3:1459-1467.

Reis IMS, De Melo WJ, Marques Júnior J, Ferraudo AS, De Melo, GMP (2014) Adsorção de cádmio em Latossolos sob vegetação de mata nativa e cultivados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 38:2014.

Revoredo MD, Melo WJ (2006) Disponibilidade de níquel em solo tratado com lodo de esgoto e cultivado com sorgo. **Bragantia** 65:679-685.

Ribas, CTG (2017). **Chumbo, níquel e zinco em plantas de milho e solos tratados com lodo de esgoto após dezoito anos consecutivos**. 49f. Dissertação (mestrado)-Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal.

Rocha ITM, Silva AV, Souza RF, Ferreira JTP (2013) Uso de resíduos como fonte de nutrientes na agricultura. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável** 8:47-52.

Rolim GS (2017) Dados meteorológicos, UNESP - Jaboticabal. 2017. Disponível em:<<http://www.fcav.unesp.br/#!/estacao>>. (Acesso em 02 de dezembro de 2017).

Sastre I, Vicente MA, Lobo MC (2001) Behaviour of cadmium and nickel in a soil amended with sewage sludge. **Land Degradation & Development** 12:27-33.

Sawhney BI, Stilweel DE (1994) Dissolution and elemental analyses of mineral-water interactions J.E. Amonette, L.W. Zelazny (Eds.), **Quantitative Methods in Soil Mineralogy, SSSA and ASA**, Madison, 49-82.

Scancar J, Milacic S, Horvat M (2000) Comparison of various digestion and extraction procedures in analysis of heavy metals in sediments. **Water, Air, and Soil Pollution** 118:87-99.

Schowaneck D, Carr R, David H, Douben P, Hall J, Kirchmann H, Patria L, Sequi P, Smith S, Webb S (2004) A risk-based methodology for deriving quality standards for organic contaminants in sewage sludge for use in agriculture – Conceptual Framework. **Regulatory Toxicology and Pharmacology**, 40: 227-251.

Siebielec G, Siebielec S, Lipski D (2018) Long-term impact of sewage sludge, digestate and mineral fertilizers on plant yield and soil biological activity. **Journal of Cleaner Production** 187: 372-379.

Silva FAS, Azevedo CAV (2009) The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **Afr. J. Agric. Res** 11:3733-3740.

SILVA FC (2009) **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 627 p.

Silva JE, Resck DVS, Sharma RD (2002) Alternativa para o biossólido produzido no Distrito Federal. I Efeito na produção de milho e na adição de metais pesados em Latossolo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 26:487-495.

Singh RP, Agrawal M (2010) Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates. **Ecotoxicology and Environmental Safety** 73: 632-641.

Sousa D.M.G., Lobato E., Eds. **Cerrado: Correção do solo e adubação**. Planaltina, Embrapa Cerrados, 2004. 416p.

Su C, Liu H, Wang S (2018) A process-based framework for soil ecosystem services study and management. **Science of The Total Environment** 627:282-289.

United States Environmental Protection Agency (1986) **Acid Digestion of Sediment, Sludge and Soils**, in USEPA (ed.), Test Methods for Evaluating Soil Waste SW-846, USEPA, Cincinnati, OH, U.S.A.

United States Environmental Protection Agency (1997) **Best Management Practices (BMPs) for soil treatment Technologies**. EPA530-R-97-007. Disponível em <www.wpa.gov>.

United States Environmental Protection Agency (2014) **The methods in SW-846 for sample digestion or dissolution - Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils**. Washington, US: United States Environmental Protection Agency. Disponível em: <http://www3.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/online/index.htm#chap> (Acessado em 28.05.2016).

Violante A, Cozzolino V, Perelomov L, Caporale AG, Pigna M (2010) Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. **J. Soil. Sci. Plant Nutr** 10:268-292.

Wang AS, Angle JS, Chaney RI, Delorme TA, Reeves RD (2006) Soil pH effects on uptake of Cd and Zn by *Thlaspi caerulescens*. **Plant and Soil**: 281: 325-337,

Wedepohl KH (1995). The composition of the continental-crust. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 59:1217-1232.

Wijayawardena MA, Naidu R, Megharaj M, Lamb D, Thavamani P, Kuchel T (2015). Influence of ageing on lead bioavailability in soils: a swine study. **Environmental Science and Pollution Research** 22:8979-8988.

Yada MM (2014). **Metais pesados, atributos químicos e bioquímicos em latossolos e plantas de milho após aplicação de lodo de esgoto por dezesseis anos consecutivos**. 88 f. Tese (doutorado). - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal.

Yafa C, Farmer JG, (2006) A comparative study of acid-extractable and total digestion methods for the determination of inorganic elements in peat material by inductively coupled plasma-optical emission spectrometry. **Analytica Chimica Acta** 557: 296-303.

Yuan H, Lu T, Wang Y, Chen Y, Lei T (2016) Sewage sludge biochar: Nutrient composition and its effect on the leaching of soil nutrients. **Geoderma** 267:17-23.

Zhang Z, Baroutian S, Munir MT, Young BR (2017) Variation in metals during wet oxidation of sewage sludge. **Bioresource technology** 245: 234-241.

Zhang YF, Zhang SY, Mao Q, Li H, Wang CW, Jiang FH, Lyu JF (2018) Volatility and partitioning of Cd and Pb during sewage sludge thermal conversion. **Waste Management** 75:333-339.