

Milho orgânico: impacto da adubação com lixiviado de aterro sanitário na composição química, produtividade e concentração de metais em grãos

Organic production in corn: impact of fertilization with landfill leachate in chemical composition, productivity and concentration of metals in grain

Wagner Ezequiel Risso^{1*}; Suzy Sayuri Sassamoto Kurokawa²;
Diva Souza Andrade³; Elisa Yoko Hirooka⁴

Resumo

A aplicação de lixiviado de aterro sanitário em solo agrícola surge como alternativa para disponibilizar este efluente, tendo como fator limitante os metais pesados. A adubação com cinco doses de lixiviado de aterro sanitário (0; 32,7; 65,4; 98,1 e 130,8 m³ ha⁻¹) e uma com ureia (120 kg ha⁻¹) foram avaliadas quanto a produtividade, composição química e teor de metais em milho, nas safras de 2010 e 2012. O acúmulo de metais em tecido foliar de plantas de aveia também foi avaliado no período de inverno, no mesmo campo experimental. A produtividade e os teores de proteínas, cinzas e lipídios em grãos aumentaram com doses crescentes de lixiviado. A concentração de Ca, Mg, Na, K, Zn, Cu, Ni e Pb em grãos de milho adubado com lixiviado não diferiram de controle sem adubação, exceto Mn, cuja concentração aumentou aplicando lixiviado ($p > 0,05$). O incremento nas doses de lixiviado tendeu a elevar o teor de Pb (safra 2010), não se observando o mesmo na safra posterior, indicando que a concentração de Pb é dependente de fatores intrínsecos e extrínsecos ao solo. Não obstante, o teor de Cu, Pb e Mn em tecido foliar de aveia aumentou com dose de lixiviado, sugerindo caráter fitorremediador. Os resultados alertam a necessidade de maior investigação para o uso seguro de lixiviado de aterro sanitário em solo agrícola.

Palavras-chave: Milho, lixiviado de aterro sanitário, disposição de efluentes, metais pesados

Abstract

The use of landfill leachate in agricultural soils as fertilizer emerges as an alternative for the disposal of this effluent, however presence of heavy metals may be a limiting factor for that use. Fertilization with five doses of landfill leachate (0, 32.7, 65.4, 98.1 and 130.8 m³ ha⁻¹) and urea (120 kg ha⁻¹) was evaluated in productivity, chemical composition and metal content of corn in crops 2010 and 2012. The accumulation of metals in leaf tissue was also evaluated in oats grown in the winter period, in the same experimental field. Productivity, besides the content proteins, lipids and ashes in grains increased with increasing doses of leachate. Concentration of Ca, Mg, Na, K, Zn, Cu, Ni and Pb in corn fertilized with landfill leachate did not differ from control without fertilization, except for Mn, which increased by applying leachate ($p > 0.05$). Increasing doses of leachate tended to raise the level of Pb (2010 crop)

¹ Discente do Curso de Doutorado em Ciência de Alimentos, Deptº de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Estadual de Londrina, UEL, Londrina, PR, Brasil. E-mail: wagner@uel.br

² Discente do Deptº de Química, UEL, Londrina, PR, Brasil. E-mail: suzy_kurokawa@hotmail.com

³ Pesquisadora Drª, Instituto Agrônomo do Paraná, IAPAR, Londrina, PR, Brasil. E-mail: diva@iapar.br

⁴ Profª Drª, Deptº de Ciência e Tecnologia de Alimentos, UEL, Londrina, PR, Brasil. E-mail: hirooka@uel.br

* Autor para correspondência

were not observed in the same crop later, indicating that Pb concentration is dependent on intrinsic and extrinsic factors to the soil. However, content of Cu, Mn and Pb in leaf tissue oat increased with doses of leachate, suggesting potential use as phytoremediation system. Results show the need for further investigation before safe use of landfill leachate in agricultural soil.

Key words: Corn, landfill leachate, effluent disposal, heavy metals

Introdução

A atividade humana gera resíduos sólidos ou líquidos de ampla variedade e complexidade que, se dispostos incorretamente, impactam o ambiente pelo potencial poluente. A Política Nacional de Resíduos Sólidos proíbe a disposição de resíduos sólidos urbanos em lixão ou aterro controlado, devendo-se substituir por aterro sanitário ou industrial, onde depositam somente resíduos sem possibilidade de reciclagem ou reaproveitamento, obrigando também a compostagem de resíduos orgânicos (BRASIL, 2010). Entretanto, existe o problema da produção de lixiviado (chorume), que é gerado pelo excesso de água pluvial que percola através das camadas de resíduos aterrados, que estão em decomposição, carreando material orgânico e íons para a solução.

O lixiviado de aterro sanitário é um efluente com alto teor de compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo ácido húmico, nitrogênio amoniacal, metais pesados, sais e xenobióticos tóxicos (HAMADA, 1999; WISZNIOWSKI et al., 2006). A geração e composição de lixiviado dependem da condição do aterro como: geologia, temperatura, umidade interna, pluviometria, além da natureza de resíduo depositado, disposição, manejo e idade do aterro (IM et al., 2001; EL FADEL et al., 2002). A composição complexa do lixiviado se caracteriza essencialmente como solução aquosa contendo quatro frações: matéria orgânica dissolvida (metano, ácidos graxos voláteis, compostos húmicos e fúlvicos), macrocomponentes inorgânicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , Zn^{2+} e HCO_3^-), metais pesados (Cd^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} e Ni^{2+}), cujo teor depende da origem dos resíduos e idade do aterro e, teor relativamente baixo de orgânicos xenobióticos, a exemplo de hidrocarbonetos

aromáticos, fenólicos e organoclorados alifáticos (CHRISTENSEN et al., 1994).

A agricultura moderna demanda grande quantidade de fertilizante para maximizar o cultivo de cereais, sendo o milho uma das mais exigentes. Uma opção para suprir essas exigências nutricionais, valorizando a preservação ambiental e a sustentabilidade à longo prazo, é a adubação orgânica. A técnica utiliza matéria orgânica gerada a partir de efluentes para adubar o solo, diminuindo ou eliminando o uso de adubos químicos. A disposição do lixiviado de aterro sanitário no solo surge como alternativa para completar o ciclo de nitrogênio (N), retornando a biodisponibilidade de $\text{NH}_x\text{-N}$ ao ecossistema pela fitorremediação por meio do sistema solo-planta, com simultânea redução de carga na estação de tratamento (CHENG; CHU, 2011). Em contraste, o perigo de metais pesados em lixiviados tem sido preocupação constante quanto à poluição do solo e água (WANG et al., 2005). Os metais pesados podem expressar seu potencial poluente diretamente em organismos do solo, pela disponibilidade às plantas em níveis fitotóxicos, além da possibilidade de transferência para cadeia alimentar por meio das próprias plantas ou pela contaminação das águas de superfície e subsuperfície (CHANG et al., 1987).

Diante do exposto, o trabalho avaliou a produtividade, composição química (teores de nutrientes, proteínas, lipídios e cinzas) e teor de metais pesados em grãos de milho (primeira safra) submetidos à adubação com diferentes doses de lixiviado de aterro sanitário. Em complemento, também avaliou-se o nível de metais em tecido foliar de aveia preta cultivada como cobertura do solo no período de inverno no mesmo campo experimental.

Material e Métodos

Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido na fazenda experimental do Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), município de Londrina, região Norte do

Estado do Paraná (22°22' S e 51°9' O), em solo classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) com textura argilosa (EMBRAPA, 2006). A Tabela 1 apresenta características químicas do solo na etapa pré-instalação do experimento em 2008 (PANCHONI, 2011).

Tabela 1. Perfil químico do solo (0-20 cm de profundidade) na etapa pré-instalação de experimento (2008).

Atributos químicos do solo	Valores
Saturação por bases (%)	73,02
P disponível (Mehlich 1) (mg dm ⁻³)	20,4
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,0
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	3,42
Ca (cmol _c dm ⁻³)	4,32
Mg (cmol _c dm ⁻³)	3,29
K (cmol _c dm ⁻³)	1,65
Soma de bases (Ca + Mg + K) (cmol _c dm ⁻³)	9,26
Capacidade de Troca de Cátions (cmol _c dm ⁻³)	12,68
Carbono total (g kg ⁻¹)	16,2
Matéria orgânica (g kg ⁻¹)	33,2
pH (0,01 mol L ⁻¹ CaCl ₂)	6,0

Delineamento experimental e aplicação do lixiviado de aterro sanitário

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições. Os seis tratamentos instalados consistiram de: controle sem adubação (D0), 120 kg de N ha⁻¹ de uréia (UR) e tratamento com doses de lixiviado (D1, D2, D3 e D4), calculadas em função do teor de nitrogênio total no lixiviado, obtendo-se 30, 60, 90 e 120 kg N ha⁻¹, respectivamente, resultando em aplicação de 32,7; 65,4; 98,1 e 130,8 m³ ha⁻¹ de lixiviado, respectivamente.

O lixiviado foi aplicado na área por nove vezes em: julho/2008, agosto/2008, outubro/2008, maio/2009, setembro/2009, dezembro/2009, junho/2011, dezembro/2011 e junho/2012. Nas seis primeiras aplicações, utilizou-se lixiviado do antigo aterro de resíduos sólidos do município de Londrina (PR). Nas duas aplicações seguintes utilizou-se o lixiviado do aterro do município de Rolândia (PR). Em cada aplicação, amostras de lixiviado foram coletadas para posterior análises de metais, sendo o pH medido *in loco* (Tabela 2).

Tabela 2. Nível de metais e pH em lixiviado proveniente de aterro sanitário e período de aplicação.

Procedência	Londrina (PR)	Rolândia (PR)	Rolândia (PR)
Aplicações	Dezembro/2009	Junho/2011	Dezembro/2011
pH	7,94	8,03	7,40
Na (mg L ⁻¹)	456	2350	425
K (mg L ⁻¹)	472	1110	157
Zn (mg L ⁻¹)	1,34	1,85	0,62
Cu (µg L ⁻¹)	537	2337	290
Pb (µg L ⁻¹)	181	13,9	1,09
Cr (µg L ⁻¹)	155	766	75,5
Cd (µg L ⁻¹)	ND	0,41	0,025
Mn (µg L ⁻¹)	17,6	729	66,2

ND = não detectado

Fonte: Elaboração dos autores.

A aveia preta (*Avena strigosa*, variedade IAPAR 61) foi semeada em maio/2009 como cobertura de solo, sem fertilizante. O milho híbrido 2B710 da Dow AgroSciences® foi semeado em novembro/2009, diretamente sobre a palhada de aveia e solo adubado com lixiviado do aterro de Londrina (PR). A aveia preta (variedade IAPAR 61) foi novamente semeada em junho/2011 como cobertura do solo antes do plantio de milho no verão, em solo adubado com lixiviado do aterro de Rolândia (PR). Em novembro/2011 o milho foi semeado diretamente sobre a palhada de aveia, em solo adubado com lixiviado do aterro de Rolândia (PR).

Amostras

Os grãos de milho com aproximadamente 20% de umidade foram colhidas de duas linhas centrais de cada parcela, secas a 50 °C por 24 horas e armazenadas a 4 °C até o momento do uso. As amostras foram trituradas asépticamente até granulometria de 50 *mesh* para proceder-se às análises da composição química.

Determinação do teor de metais

A metodologia utilizada foi descrita por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997). Aliquotas de 0,50 g de milho triturado a 50 *mesh* foram transferidas para tubos de digestão e adicionado 6 mL de uma mistura de HNO₃ e HClO₄ na proporção 4:1 (v/v). Os tubos foram submetidos a digestão sob aumento gradativo de temperatura até atingir 210 °C, mantida até a formação de fumos brancos de HClO₄ e o extrato tornar-se incolor. Após esfriamento, os extratos foram transferidos para balões de 50 mL e o volume completado com água deionizada. Após a oxidação do material vegetal pela digestão nítrico-perclórica, os metais foram quantificados em espectrômetro de absorção atômica com atomizador de forno de grafite e/ou chama (AAAnalyst 700, Perkin Elmer, EUA) em comparação com solução

padrão de referência específico para cada metal (Specsol, Brasil). As concentrações de metais nos grãos de milho foram representadas como mg de metal por peso seco de milho (mg kg⁻¹)

Análises químicas

O teor de proteínas nos grãos de milho foi determinado pelo método Kjeldahl (AOAC, 1995) e o resultado multiplicado pelo fator de conversão nitrogênio:proteína (6,25). O teor de cinzas foi determinado mediante pesagem de resíduos de incineração (IAL, 1985). O teor de lipídios foi determinado pelo método Soxhlet (AOAC, 1995). A determinação de umidade foi feita pelo método de secagem a 105 °C (IAL, 2008).

Análise estatística

A análise de composição química e teores de metais foram avaliadas por análise de variância, seguida por teste de Tukey ou Duncan ($p < 0,05$). Toda análise estatística foi realizada pelo software *Statistica*, versão 7.0 (Stat Soft, Inc., EUA).

Resultados e Discussão

A adubação de solo com lixiviado de aterro sanitário, aplicado em conformidade com a quantidade de N requerido pela cultura, proporcionou aumento significativo nos teores de proteínas nos grãos de milho ($p < 0,05$, Tabela 3). O efeito se justifica pela elevada carga de N-amoniacal e material orgânico estabilizado presente no lixiviado. O teor de proteína em grãos aumentou significativamente com o incremento das doses de lixiviado em ambos os anos ($p < 0,05$). Proteína em grãos de milho submetido a maior dose de lixiviado (D4) diferiu significativamente dos demais tratamentos (D1, D2 e D3). O teor médio obtido em D4 não diferiu de tratamento com adubação com ureia (UR) em ambos os anos avaliados ($p < 0,05$). Sugere-se também que o tipo de adubação não

interferiu na absorção final do N e crescimento de milho, pois em trabalho realizado por Fernández-Luqueño et al. (2010), no qual compararam o efeito da aplicação de águas residuárias e ureia, ambos

em quantidades que forneceram 120 kg de N ha⁻¹ para cultura do milho, as características da planta, inclusive teor de N foliar, não foram afetadas pelo tipo de fertilização.

Tabela 3. Composição química parcial de grãos de milho cultivado em solo tratado com lixiviado de aterro sanitário, safras 2010 e 2012.

Safra	Tratamento	Cinzas* (%)	Proteínas* (%)	Lipídios* (%)
2010 (n = 24)	D0	1,41 ± 0,06 ^{ab}	6,38 ± 0,64 ^d	4,91 ± 0,53 ^a
	D1	1,49 ± 0,17 ^{ab}	7,06 ± 0,63 ^b	7,71 ± 2,25 ^b
	D2	1,63 ± 0,11 ^a	7,14 ± 0,30 ^{ac}	6,09 ± 0,48 ^b
	D3	1,45 ± 0,02 ^{ab}	7,32 ± 0,30 ^{bc}	6,02 ± 1,27 ^b
	D4	1,50 ± 0,10 ^{ab}	8,05 ± 0,31 ^a	7,09 ± 1,22 ^b
	UR	1,33 ± 0,10 ^b	8,21 ± 0,35 ^a	7,01 ± 2,68 ^b
2012 (n = 24)	D0	1,43 ± 0,08 ^a	7,21 ± 0,27 ^b	5,88 ± 0,62 ^b
	D1	1,38 ± 0,06 ^{ab}	7,35 ± 0,28 ^b	6,50 ± 0,28 ^{ab}
	D2	1,23 ± 0,12 ^c	7,33 ± 0,41 ^b	6,28 ± 0,71 ^b
	D3	1,24 ± 0,06 ^{bc}	7,47 ± 0,27 ^b	6,65 ± 0,93 ^{ab}
	D4	1,20 ± 0,08 ^c	7,97 ± 0,31 ^a	7,52 ± 1,67 ^{ab}
	UR	1,17 ± 0,12 ^c	8,22 ± 0,25 ^a	8,58 ± 2,34 ^a

Média seguida pela mesma letra minúscula na vertical, dentro de cada ano, não apresenta diferença estatística pelo teste de Tukey 5%.

D0 = controle sem lixiviado; D1 = 32,71 m³ ha⁻¹; D2 = 65,42 m³ ha⁻¹; D3 = 98,13 m³ ha⁻¹; D4 = 130,83 m³ ha⁻¹; UR = 120 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia.

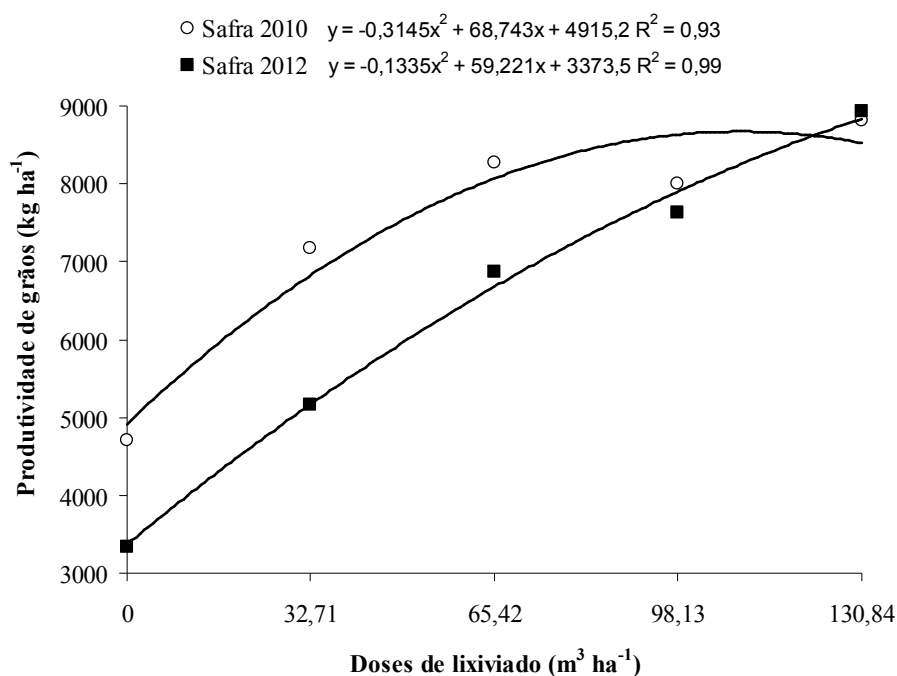
*Expresso em porcentagem na matéria seca.

Fonte: Elaboração dos autores.

A produtividade de grãos de milho foi responsiva à adição de lixiviado já na primeira dose, com tratamento com lixiviado diferindo significativamente do controle sem adubação (D0), em ambos os anos avaliados ($p < 0,05$). A Figura 1 mostra que o incremento no teor de nutrientes contribuiu no melhor desenvolvimento da cultura de milho, com aumento da produtividade de grãos em resposta à adição do lixiviado. Assim, seja N fornecido via lixiviado ou via ureia praticamente dobrou a produção de grãos, se comparado ao controle sem adubação. Prabhari et al. (2009) também observaram aumento na produtividade de milho em solo tratado com componente sólido de aterro sanitário na Tailândia, obtendo-se rendimento de até 85% superior ao controle sem adubação.

O teor de lipídio em grãos de milho sob adubação com lixiviado aumentou em comparação ao controle sem adubação (D0) no ano 2010 ($p < 0,05$, Tabela 3). Em 2012, embora o efeito seja menos pronunciado, os tratamentos com lixiviado também tenderam a apresentar teores de lipídio superior, no qual somente o tratamento com ureia apresentou teor de lipídio significativamente maior em comparação ao controle ($p < 0,05$). Marsaro Júnior et al. (2007) relataram que três das cinco cultivares de milho sob diferentes sistemas de adubação (orgânica, mineral, orgânica e mineral combinadas) apresentaram menor teor de lipídio na ausência de adubação, indicando que a disponibilidade de minerais no solo poderia modificar o teor de lipídio em grãos de milho.

Figura 1. Produtividade de milho em função a doses crescentes de lixiviado de aterro sanitário, safras 2010 (n = 24) e 2012 (n = 24).



Fonte: Elaboração dos autores.

O teor de cinzas em grãos de milho mostrou alguma diferença entre os tratamentos, mas observou-se ampla variabilidade nos resultados (Tabela 3). Maior teor de cinzas ocorreu no tratamento com lixiviado, se comparado à adubação com ureia, principalmente no ano 2010, provavelmente devido ao maior teor de nutrientes no lixiviado, além da qualidade e quantidade da matéria orgânica. O lixiviado pode apresentar maior teor de metais totais e compostos orgânicos dissolvidos, bem como nutrientes de composição desequilibrada para o crescimento de planta (SANG et al., 2010).

A Tabela 4 apresenta teores de magnésio (Mg), zinco (Zn), cálcio (Ca), sódio (Na), manganês (Mn) e potássio (K) em grãos de milho nas safras de 2010 e 2012. Doses crescentes de lixiviado de aterro sanitário no solo não afetou o teor de metais, embora determinados tratamentos mostrassem certas tendências. No ano 2010, os teores de Ca, Mg, Na e Zn nas amostras adubadas com lixiviado de antigo aterro sanitário de Londrina (PR) não diferiram do controle sem adubação ($p > 0,05$). Embora observasse diferenças significativas entre alguns tratamentos, não houve correlação entre a aplicação de doses crescentes de lixiviado com o acúmulo de metais nos grãos.

Tabela 4. Níveis de metais em grãos de milho (n = 24) cultivados em solo tratados com lixiviado de aterro sanitário, safras 2010 e 2012.

Safr	Tratamentos	Médias por tratamentos (mg kg ⁻¹)					
		Mg	Zn	Ca	Na	Mn	K
2010	D0	171,66 ± 66,19 ^a	32,57 ± 1,69 ^{a,b}	35,71 ± 4,49 ^b	135,00 ± 25,14 ^b	6,04 ± 0,48 ^c	5403,1 ± 515,4 ^{a,b}
	D1	106,18 ± 20,88 ^a	32,88 ± 4,60 ^{a,b}	37,73 ± 3,41 ^{a,b}	144,69 ± 14,33 ^b	9,08 ± 0,85 ^b	4421,4 ± 460,6 ^c
	D2	119,03 ± 71,69 ^a	34,06 ± 2,37 ^a	33,48 ± 3,10 ^b	153,18 ± 22,50 ^{a,b}	9,03 ± 2,13 ^b	6029,6 ± 467,4 ^a
	D3	114,89 ± 59,18 ^a	30,54 ± 3,82 ^{a,b}	35,96 ± 5,33 ^b	133,68 ± 17,82 ^b	8,05 ± 1,03 ^b	4133,0 ± 185,7 ^c
	D4	109,33 ± 26,40 ^a	31,40 ± 3,83 ^{a,b}	33,96 ± 1,63 ^b	126,44 ± 16,69 ^b	9,16 ± 0,38 ^b	4523,5 ± 163,6 ^c
	UR	123,66 ± 48,28 ^a	28,31 ± 1,05 ^b	42,72 ± 4,33 ^a	182,94 ± 23,89 ^a	10,90 ± 1,68 ^a	5301,5 ± 648,4 ^b
2012	D0	98,10 ± 4,83 ^a	17,27 ± 2,47 ^{a,b}	23,73 ± 9,07 ^a	139,86 ± 9,78 ^{a,b}	7,72 ± 0,64 ^b	4041,9 ± 273,2 ^a
	D1	99,28 ± 11,06 ^a	22,00 ± 1,75 ^a	38,07 ± 16,73 ^a	99,03 ± 14,66 ^c	8,19 ± 0,72 ^{a,b}	3361,2 ± 261,5 ^a
	D2	92,35 ± 3,00 ^a	20,22 ± 1,74 ^{a,b}	32,44 ± 3,92 ^a	106,35 ± 20,80 ^c	8,24 ± 0,71 ^{a,b}	3224,8 ± 494,8 ^a
	D3	90,09 ± 3,51 ^a	20,28 ± 2,68 ^{a,b}	31,52 ± 11,90 ^a	117,82 ± 19,67 ^{b,c}	8,30 ± 0,77 ^{a,b}	3582,5 ± 774,8 ^a
	D4	92,20 ± 2,09 ^a	17,77 ± 1,28 ^b	30,05 ± 8,72 ^a	143,83 ± 12,51 ^a	8,44 ± 0,53 ^{a,b}	3598,1 ± 260,1 ^a
	UR	93,14 ± 3,64 ^a	13,31 ± 3,05 ^c	26,20 ± 10,57 ^a	145,56 ± 6,18 ^a	8,81 ± 1,06 ^a	2823,1 ± 331,8 ^a

Média seguida pela mesma letra minúscula na vertical, dentro de cada ano, não apresenta diferença estatística pelo teste de Duncan 5%. D0 = controle sem lixiviado; D1 = 32,71 m³ ha⁻¹; D2 = 65,42 m³ ha⁻¹; D3 = 98,13 m³ ha⁻¹; D4 = 130,83 m³ ha⁻¹; UR = 120 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia.

Fonte: Elaboração dos autores.

Em 2010, o teor de Mn nos tratamentos com lixiviado diferiram de controle (D0), não se observando diferença significativa entre tratamentos com lixiviado. Considera-se que Mn solúvel no solo seja facilmente absorvido pela planta, observando relação direta entre o teor solúvel do elemento no solo com o teor na planta (DECHEN; NACHTIGALL, 2006). Em contraste, existe uma correlação negativa entre o teor de Mn na planta e aumento de pH do solo, sendo este correlacionado ao teor de matéria orgânica (MARSCHNER, 1995). O aumento no teor de Mn em grãos de milho decorreu da incorporação via lixiviado, ou devido à alteração na propriedade físico-química do solo,

desencadeada pela aplicação de lixiviado ou ureia e, conseqüente aumento na fitodisponibilidade de Mn. No ano 2010, maiores teores de Mn, Ca e Na ocorreram nos tratamentos com ureia (UR), indicando efeito importante de adubação mineral na absorção destes metais (Tabela 4).

No ano 2012, no qual os tratamentos receberam lixiviado do aterro sanitário de Rolândia (PR), os teores de Ca, Mg, Zn e K em amostras de milho adubadas com lixiviado não diferiram do controle sem adubação, ou seja, a aplicação de lixiviado não influenciou na fitodisponibilidade e acúmulo destes metais (p > 0,05, Tabela 4). Contudo, maiores teores de Mn foram observadas nos tratamentos

com lixiviado e com ureia (UR), em comparação ao controle, indicando efeito positivo da adubação com N na absorção de Mn. O teor de Na em grãos de milho (safra 2012) aumentou com o incremento nas doses de lixiviado ($p < 0,05$), sendo indicativo da contribuição de Na presente no lixiviado no teor deste metal nos grãos.

A Tabela 5 apresenta os níveis de chumbo (Pb), cobre (Cu) e níquel (Ni) em grãos de milho, safra

2010 e 2012. cromo (Cr), cádmio (Cd) e arsênio (As) ocorreram em nível inferior ao limite de detecção do método utilizado. A legislação brasileira regulamenta o limite máximo de tolerância (LMT) de metais em alimentos desde 1965 (BRASIL, 1965), sendo atualizados e alguns mantidos pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (BRASIL, 1998). O LMT estabelecidos pela legislação para Pb, Cu, Ni, Cd, As e Cr são, respectivamente, 0,5; 10,0; 5,0; 1,0; 1,0 e 0,1 mg kg⁻¹.

Tabela 5. Níveis de metais pesados em grãos de milho cultivados em solo tratado com lixiviado de aterro sanitário, safras 2010 e 2012.

Safr	Tratamentos	Metais pesados (mg kg ⁻¹)		
		Cu	Ni	Pb
2010 (n = 24)	D0	2,34 ± 0,65 ^a	0,41 ± 0,06 ^a	0,47 ± 0,20 ^b
	D1	1,83 ± 0,30 ^a	0,29 ± 0,11 ^{a,b}	0,49 ± 0,23 ^b
	D2	1,97 ± 0,23 ^a	0,31 ± 0,13 ^{a,b}	0,47 ± 0,15 ^b
	D3	2,10 ± 0,55 ^a	0,20 ± 0,04 ^b	0,62 ± 0,17 ^{a,b}
	D4	1,81 ± 0,24 ^a	0,20 ± 0,04 ^b	0,76 ± 0,28 ^a
	UR	2,25 ± 0,66 ^a	0,40 ± 0,16 ^a	0,48 ± 0,25 ^b
2012 (n = 24)	D0	3,28 ± 0,41 ^a	0,41 ± 0,06 ^{a,b}	0,006 ± 0,007 ^b
	D1	3,30 ± 0,36 ^a	0,43 ± 0,11 ^a	0,014 ± 0,007 ^{a,b}
	D2	3,72 ± 0,36 ^a	0,40 ± 0,13 ^{a,b,c}	0,026 ± 0,025 ^a
	D3	3,71 ± 0,52 ^a	0,38 ± 0,04 ^{a,b,c}	0,006 ± 0,004 ^b
	D4	3,69 ± 0,68 ^a	0,36 ± 0,04 ^{b,c}	0,016 ± 0,008 ^{a,b}
	UR	3,85 ± 0,67 ^a	0,34 ± 0,16 ^c	0,005 ± 0,006 ^b

Média seguida pela mesma letra minúscula na vertical, dentro de cada ano, não apresenta diferença estatística pelo teste de Duncan 5%. D0 = controle sem lixiviado; D1 = 32,71 m³ ha⁻¹; D2 = 65,42 m³ ha⁻¹; D3 = 98,13 m³ ha⁻¹; D4 = 130,83 m³ ha⁻¹; UR = 120 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia.

Fonte: Elaboração dos autores.

Doses crescentes de lixiviado em solo não causou acúmulo de Cu em grãos nas safras avaliadas ($p > 0,05$). Anjos e Mattiazzo (2000) relataram aumento linear na concentração de Cu na cultura de milho sob diferentes doses de biossólidos provenientes de Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), com o teor de Cu em grãos variando de 1 a 3 mg kg⁻¹, enquanto nas folhas variou de 13 a 22 mg kg⁻¹. Contudo, no presente trabalho a translocação de Cu tecidual para os grãos foi pequena e a aplicação de lixiviado não produziu acúmulo deste metal nos grãos. A Tabela 5 mostra que o nível de Cu em grãos de milho em todos os tratamentos apresentaram-se inferior ao LMT

(10 mg kg⁻¹) estabelecido para alimentos destinados ao consumo humano, indicando a provável baixa translocação de Cu tecidual para os grãos.

Em relação ao níquel, a redução na concentração deste metal em milho ocorreu com aplicação de doses crescentes de lixiviado proveniente do aterro sanitário de Londrina (PR), com os tratamentos D3 e D4 (ambos com 0,20 mg kg⁻¹) apresentando níveis inferiores em comparação ao controle D0 (0,40 mg kg⁻¹). Prabpai et al. (2009) também observaram nível de Ni inferior em milho cultivado em solo tratado com composto sólido de aterro sanitário,

em relação ao controle. Referente a aplicação de lixiviado proveniente do aterro de Rolândia (PR), safra 2012, o nível de Ni nos tratamentos D1 a D4 não diferiu de controle D0, embora apresentassem superiores ao tratamento com ureia (UR). As concentrações médias de Ni nos grãos de milho em todos os tratamentos ficaram abaixo do LMT (5 mg kg⁻¹).

No ano 2010, doses crescentes de lixiviado proveniente do aterro sanitário de Londrina (PR) aumentaram os níveis de Pb em milho, com tratamento D4 apresentando 0,76 mg kg⁻¹ de Pb ($p < 0,05$). Silva et al. (2003) avaliaram a disponibilidade de metais pesados em diferentes solos submetidos à fertilização com doses crescentes de composto de lixo urbano e relataram que, entre os metais avaliados, o Pb foi o elemento que mostrou incremento mais acentuado com aumento da dose de composto. Os LMT para Pb em cereais *in natura* é de 0,50 mg kg⁻¹, logo os grãos pertencentes aos tratamentos D1, D3 e D4 apresentaram-se acima do limite, indicando que níveis preocupantes podem ser atingidos empregando adubação com lixiviado deste local (Tabela 5).

Em suma, o incremento nas doses de lixiviado do aterro de Londrina elevou o teor de Pb (safra 2010), enquanto que não se observou o mesmo na safra posterior aplicando lixiviado de Rolândia (safra 2012). A variação na concentração de Pb pode ser atribuída a diversos fatores, seja intrínseco (composição do lixiviado como percentual de matéria orgânica, concentrações e tipos de cátions e ânions presentes), e/ou extrínseco (pluviometria, cultura em rotação, pH e textura do solo e tipo de argilomineral, entre outros); fatores estes que

podem afetar sensivelmente a mobilidade do Pb na superfície do solo e, a disponibilidade para planta (ZIMDAHL; SKOGERBOE, 1977).

A Tabela 6 apresenta as concentrações (mg kg⁻¹) de Pb, Cu, Cr, Na, K, Ni e Mn do tecido foliar de aveia preta (variedade IAPAR 61), que foram cultivadas no período do inverno como cobertura do solo, antes do plantio do milho. As concentrações de Cd e As ficaram abaixo do limite de detecção do método utilizado. A aveia preta também foi submetida à adubação com doses crescentes de lixiviado, nas mesmas doses aplicadas no experimento com milho, sendo o lixiviado proveniente do aterro sanitário de Rolândia (PR). A concentração de Na no tecido foliar aumentou com aplicação de doses crescentes de lixiviado ($p < 0,05$, Tabela 6), principalmente da aplicação realizada em junho/2009, uma vez que um possível efeito residual das aplicações do ano anterior é pouco esperado devido à remoção deste íon do perfil do solo por lixiviação causada por precipitações pluviais. O lixiviado aplicado no plantio de aveia apresentou alta concentração de Na (2350 mg L⁻¹) em comparação ao aplicado anteriormente (456 mg L⁻¹) (Tabela 2), refletindo, possivelmente, em elevado acúmulo de Na em tecido foliar de aveia. O lixiviado pode conter alta carga orgânica e minerais dissolvidos, como N-amoniaco, K e Na, cuja alta concentração no solo pode proporcionar impacto negativo ao ambiente. A aplicação contínua de lixiviado durante um período longo de tempo pode levar a salinização do solo devido ao acúmulo de Na. O excesso de Na pode causar limitações no desenvolvimento das plantas, dispersão de argilas e da matéria orgânica (LEAL et al., 2009).

Tabela 6. Níveis de metais em tecido foliar de plantas de aveia (n = 24) cultivadas em solo tratado com lixiviado de aterro sanitário, uréia e controle sem adubação (2011).

Tratamentos	Médias por tratamento (mg kg ⁻¹)						
	Cu	Ni	Pb	Na	K	Cr	Mn
D0	37,82 ±	3,63 ±	9,66 ±	141,77 ±	10236,8 ±	3,73 ±	233,76 ±
	22,90 ^{a,b}	0,29 ^{a,b}	2,81 ^a	33,2 ^a	1601,2 ^a	0,09 ^{a,b}	22,52 ^{a,b}
D1	30,42 ±	4,29 ±	9,37 ±	1228,8 ±	9194,6 ±	3,38 ±	247,82 ±
	5,01 ^b	0,58 ^a	0,87 ^a	265,8 ^b	1347,2 ^a	0,44 ^{a,b}	36,71 ^{a,b}
D2	59,67 ±	3,48 ±	9,80 ±	1549,7 ±	9488,3 ±	3,76 ±	247,38 ±
	11,30 ^a	0,87 ^{a,b}	1,56 ^a	357,5 ^b	1720,4 ^a	0,30 ^{a,b}	54,31 ^{a,b}
D3	42,85 ±	3,31 ±	10,03 ±	1136,2 ±	10206,1 ±	3,05 ±	300,90 ±
	13,13 ^{a,b}	0,76 ^{a,b}	2,10 ^a	370,6 ^b	1621,0 ^a	0,79 ^b	69,60 ^a
D4	55,54 ±	2,82 ±	12,75 ±	1361,8 ±	7523,4 ±	2,88 ±	291,45 ±
	17,62 ^a	0,72 ^b	2,75 ^a	295,3 ^b	409,8 ^a	0,95 ^b	69,15 ^{a,b}
UR	37,92 ±	3,46 ±	9,63 ±	149,40 ±	10562,9 ±	4,19 ±	210,12 ±
	4,09 ^{a,b}	0,28 ^{a,b}	1,66 ^a	21,8 ^a	3092,3 ^a	0,31 ^a	29,24 ^b

Média seguida pela mesma letra minúscula na vertical não apresenta diferença estatística pelo teste de Duncan 5%. D0 = controle sem lixiviado; D1 = 32,71 m³ ha⁻¹; D2 = 65,42 m³ ha⁻¹; D3 = 98,13 m³ ha⁻¹; D4 = 130,83 m³ ha⁻¹; UR = 120 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia.

Fonte: Elaboração dos autores.

A Tabela 6 mostra a tendência de aumento no nível de Cu e Pb incrementando a dose de lixiviado. Maior nível de Cu foi detectado nos tratamentos D2 (59,67 mg kg⁻¹) e D4 (55,54 mg kg⁻¹) e menores em D1 (30,42 mg kg⁻¹) e controle D0 (37,82 mg kg⁻¹). Em relação ao Pb, os maiores níveis foram detectados nos tratamentos D3 (10,03 mg kg⁻¹) e D4 (12,75 mg kg⁻¹) e, menores no controle D0 (9,66 mg kg⁻¹) e UR (9,63 mg kg⁻¹). Maior nível de Mn foram encontradas nos tratamentos que receberam lixiviado, sendo que D3 (300,90 mg kg⁻¹) e D4 (291,45 mg kg⁻¹) apresentaram maiores médias (p < 0,05).

Conclusão

Os efeitos positivos da aplicação de lixiviado em relação ao teor de proteínas, lipídios e cinzas em milho, além da produtividade de grãos, sugerem seu potencial como fonte de nutrientes, sobretudo nitrogênio. A aplicação de doses crescentes de lixiviado de aterro sanitário não apresentou efeito quanto à acumulação de metais em grãos de

milho, exceto Mn, Pb e Na, cujas concentrações aumentaram com aplicação de lixiviado. Não obstante, o teor de Cu, Pb e Mn em tecido foliar de aveia aumentou com a dose de lixiviado, sugerindo caráter biorremediador. Os resultados alertam a necessidade de maior investigação quanto ao uso seguro de lixiviado de aterro sanitário em solo agrícola.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Científico Tecnológico (CNPq) em associação com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), à Fundação Araucária, ao UGF Fundo Paraná-SETI e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Edital Nanobio EDITAL REDE NANOBIOTEC-BRASIL N° 04/2008 (Projeto n° 23 – 2008) pelo apoio financeiro.

Referências

- ANJOS, A. R. M.; MATTIAZZO, M. E. Metais pesados em plantas de milho cultivadas em latossolos repetidamente tratados com biossólidos. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 769-776, 2000.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS – AOAC. Official Methods of Analysis. 16th ed. Washington DC: AOAC, v. 2, 1995.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária – ANVISA. Portaria nº 685 de 27 de agosto de 1998. Aprova o regulamento técnico: princípios gerais para o estabelecimento de níveis máximos de contaminantes químicos em alimentos e seu anexo: limites máximos de tolerância para contaminantes inorgânicos. *Diário Oficial [da] União*, Brasília, 28 ago. 1998. Seção 1, n. 165-E, p. 28-29.
- _____. Decreto nº 55871, de 26 de março de 1965. Modifica o Decreto nº 50.040, de 24 de janeiro de 1961, referente a normas reguladoras do emprego de aditivos para alimentos, alterado pelo Decreto nº 691, de 13 de março de 1962. *Diário Oficial [da] União*, Brasília, 09 abr. 1965. Seção 1, p. 3610.
- _____. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 2008; e dá outras providências. *Diário Oficial [da] União*, Brasília, 03 ago. 2010. Seção 1, p. 3-7,
- CHANG, A. C.; HINESLY, T. D.; BATES, T. E.; DONER, H. E.; DOWDY, R. H.; RYAN, J. A. Effect of long-term sludge application on accumulation of trace elements by crops. In: PAGE, A. L.; LOGAN, T. G.; RYAN, J. A. *Land application of sludge*. Chelsea: Lewis Publishers, 1987. p. 53-66.
- CHENG, C. Y.; CHU, L. M. Fate and distribution of nitrogen in soil and plants irrigated with landfill leachate. *Waste Management*, New York, v. 31, n. 6, p. 1239-1249, 2011.
- CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSSEN, P.; ALBRECHTSEN, H. J.; HERON, G.; NIELSEN, P. H.; BJERG, P. L.; HOLM, P. E. Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, London, v. 24, n. 2, p. 119-202, 1994.
- DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Micronutrientes. In: FERNANDES, M. S. *Nutrição mineral de plantas*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, SBCS, 2006. p. 552-557.
- EL-FADEL, M.; BOU-ZEID, E.; CHAHINE, W.; ALAYLI, B. Temporal variation of leachate quality from pre-sorted and baled municipal solid waste with high organic and moisture content. *Waste Management*, New York, v. 22, n. 3, p. 269-282, 2002.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos; Embrapa Solos, 2006. 306 p.
- FERNÁNDEZ-LUQUEÑO, F.; REVES-VARELA, V.; CERVANTES-SANTIAGO, F.; GÓMEZ-JUÁREZ, C.; SANTILLÁN-ARIAS, A.; DENDOOVEN, L. Emissions of carbon dioxide, methane and nitrous oxide from soil receiving urban wastewater for maize (*Zea mays* L.) cultivation. *Plant and Soil*, The Hague, v. 331, n. 1-2, p. 203-215, 2010.
- HAMADA, J. Estimativa de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários. Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1999, Foz do Iguaçu. *Anais...* Rio de Janeiro: Trabalhos técnicos. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997. p. 10.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ – IAL. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. Métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. p. 98-99.
- _____. Métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 3. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 1985. p. 553.
- IM, J. H.; WOO, H. J.; CHOI, M. W.; HAN, K. B.; KIM, C. W. Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system. *Water Research*, Oxford, v. 35, n. 10, p. 2403-2410, 2001.
- LEAL, R. M. P.; HERPIN, U.; FONSECA, A. F.; FIRME, L. P.; MONTES, C. R.; MELFI, A. J. Sodicinity and salinity in a Brazil Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 96, n. 2, p. 307-316, 2009.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. *Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Potafos, 1997. 319 p.
- MARSARO JÚNIOR, A. L.; LAZZARI, S. M. N.; SOUZA, J. L. de; LAZZARI, F. A.; CÂNDIDO, L. M. B. Influência de diferentes sistemas de adubação na composição nutricional do milho *Zea mays* L. (*Poaceae*) e seus efeitos no ataque de *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: *Curculionidae*) no produto armazenado. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 28, n. 1, p. 51-64, 2007.

- MARSCHNER, H. Adaptation of plants to adverse chemical soil conditions. In: _____. *Mineral nutrition of higher plant*. 2. ed. New York: Academic Press, 1995. p. 409-472.
- PANCHONI, L. C. *Potencial de lixiviado de aterro sanitário como fonte de nutrientes e efeitos em propriedades do solo*. 2011. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- PRABPAI, S.; CHARERNTANYARAK, L.; SIRI, B.; MOORE, M. R.; NOLLER, B. N. Effects of residues from municipal solid waste landfill on corn yield and heavy metal content. *Waste Management*, New York, v. 29, n. 8, p. 2316-2320, 2009.
- SANG, N.; HAN, M.; LI, G.; HUANG, M. Landfill leachate affects metabolic responses of *Zea mays* L. seedlings. *Waste Management*, New York v. 30, n. 5, p. 856-862, 2010.
- SILVA, F. C.; SILVA, C. A.; BERGAMASCO, A. F.; RAMALHO, A. L. Efeito do período de incubação e de doses de composto de lixo urbano na disponibilidade de metais pesados em diferentes solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, n. 3, p. 403-412, 2003.
- WANG, C.; HU, X.; CHEN, M. L.; WU, Y.H. Total concentrations and fractions of Cd, Cr, Pb, Cu, Ni and Zn in sewage sludge from municipal and industrial wastewater treatment plants. *Journal Hazardous Material*, Amsterdam, v. 119, n. 1-3, p. 245-249, 2005.
- WISZNIOWSKI, J.; ROBERT, D.; SURMACZ-GORSKA, J.; MIKSCH, K.; WEBER, J. V. Landfill leachate treatment methods: A review. *Environmental Chemistry Letters*, New York, v. 4, n. 1, p. 51-61, 2006.
- ZIMDAHL, R.; SKOGERBOE, K. R. Behavior of lead in soil. *Environmental Science & Technology*, Washington DC, v. 11, n. 13, p. 1202-1206, 1977.