

**ANÁLISE DA VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO NA REMOÇÃO DE NUTRIENTE E DA PRODUTIVIDADE DA BRACHIARIA HUMIDICULA UTILIZADA EM RAMPAS DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO OPERANDO EM CONDIÇÕES REAIS**Rodrigo Nobre Santana¹, Marcus Vinícius Araújo Marques², Cláudio Gomes Silva³ & Danilo Pereira Ribeiro⁴¹ Engenheiro Agrícola e Ambiental, Formado na IFNMG/Campus Januária-MG, rodrigonobresantana@gmail.com² Engenheiro Agrícola e Ambiental, Mestrando DESA/UFMG Belo Horizonte-MG, marcus.ifnmg@yahoo.com.br³ Engenheiro Agrícola e Ambiental, Formado na IFNMG/Campus Januária-MG, claudio.gomess@yahoo.com.br⁴ Engenheiro Agrônomo, D.S. em Engenharia Agrícola, Professore Efetivo do IFNMG, danilo.ribeiro@ifnmg.edu.br**Palavras-chave:**Água residuária
características do solo
remoção de nutrientes**RESUMO**

No Brasil, o sistema de tratamento de esgoto em rampas de escoamento superficial foi implantando por algumas companhias de saneamento por ser considerado de baixo custo e apresentar eficiência de tratamento semelhante ou superior às obtidas pelos métodos convencionais, desde que seja manejado adequadamente. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, a remoção de nutrientes e a produtividade da gramínea *Brachiaria humidicula*, cultivada em rampa de escoamento superficial no tratamento de esgoto sanitário. O sistema funciona no município de Januária-MG, a rampa recebe efluente oriundo de um reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA), precedido de tratamento preliminar (gradeamento). Foram coletadas 24 amostras de solo e de tecido vegetal em uma malha montada sobre as rampas. A partir das amostras de solo, determinou-se o pH, a condutividade elétrica (CE), a razão de adsorção de sódio (RAS), o percentual de sódio trocável (PST) e os teores de matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), sódio (Na), ferro (Fe), zinco (Zn) e cobre (Cu). Nas amostras de tecido vegetal determinou-se a produtividade de matéria fresca e seca e a remoção de nitrogênio (N), P e K. Observou-se elevada variação espacial da produtividade, onde o valor médio encontrado de matéria fresca e seca foi de 84 e 14 t ha⁻¹, respectivamente. Os macronutrientes analisados, P e K, apresentaram valores médios de 577,6 e 23,9 mg dm⁻³, respectivamente. As maiores concentrações dos elementos Na, K, Zn, Mn, Mg, Ca, Fe e Cu foram obtidas nas regiões centrais da área, o que pode indicar um possível caminho preferencial do efluente. A remoção média de N, P e K foi de aproximadamente 360, 65 e 430 t ha⁻¹, respectivamente.

Keywords:wastewater
soil characteristics
nutrient removal**ANALYSIS OF SPATIAL VARIABILITY OF CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOIL IN NUTRIENT REMOVAL AND PRODUCTIVITY *BRACHIARIA humidicula* CULTIVATED IN SEWAGE TREATMENT RAMPS SANITARY OPERATING CONDITIONS IN REAL****ABSTRACT**

In Brazil, sewage treatment in overland flow systems was implemented by some sanitation companies due to low cost and similar or greater treatment efficiency in comparison to those obtained by conventional methods, provided that these overland flow systems are properly up kept. This work aimed to evaluate the spatial variability of chemical attributes in the soil, nutrients removal and *Brachiaria humidicula* productivity in overland flow systems during sewage treatment. Systems found in the municipality of Januária-MG receive effluent from an upflow anaerobic sludge blanket (UASB), which had been through preliminary treatment (solid removal). Twenty four soil samples and plant tissue samples were collected into a mesh built on the ramps. The pH, electric conductivity (EC), ratio of sodium absorption (RAS), exchangeable sodium percent (ESP) were analyzed, as well as contents of organic matter (OM), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sodium (Na), iron (Fe), zinc (Zn) and copper (Cu). Plant tissue samples were analyzed considering the productivity of fresh and dry matter, removal of nitrogen (N), P and K. There was a high spatial variation in productivity, in which the mean value for fresh and dry matter was 84 and 14 t ha⁻¹, respectively. Macronutrients P and K were analyzed and showed mean values of 577.6 and 23.9 mg dm⁻³, respectively. The highest concentrations of Na, K, Zn, Mn, Mg, Ca, Fe and Cu were obtained in the central region of the area, which can indicate the preferential pathway of the effluent. The average removal of N, P and K was approximately 360, 65 and 430 t ha⁻¹, respectively.

INTRODUÇÃO

No Brasil, as autarquias e companhias de saneamento básico têm procurado alternativas para a implantação de sistemas de tratamento de esgoto de baixo custo e que apresentem eficiência semelhante ou superior à obtida pelos métodos convencionais. Sistemas de disposição de águas residuárias em solo por rampas de escoamento superficial são uma alternativa viável, que permite a reciclagem dos nutrientes presentes, em prol do desenvolvimento da vegetação (FONSECA & SOARES, 2008).

A vegetação cultivada nas rampas agrega benefícios ao sistema, onde essa produção pode ser utilizada para outros fins, como constituir a alimentação animal ou ser incorporada ao solo como fonte de matéria orgânica (TONETTI *et al.*, 2009).

O princípio de funcionamento das rampas de escoamento superficial baseia-se na aplicação da água residuária em altas taxas, iniciando-se na parte superior de uma rampa vegetada, escoando sobre a superfície do solo, ocorrendo a depuração ao longo da rampa de tratamento (MATOS, 2007). Essa tecnologia, além de não necessitar de edificações ou equipamentos mais sofisticados, conta com algumas vantagens na sua implementação no Brasil, como a disponibilidade de área e as condições climáticas favoráveis, surgindo com uma alternativa ao tratamento de esgoto de pequenas comunidades (MILEN, 2014).

O solo é um sistema disperso, polifásico e heterogêneo, o que possibilita sua utilização como meio de tratamento de águas residuárias, promovendo, assim, a remoção dos nutrientes, além da oxidação da matéria orgânica promovida pelas bactérias, que estão estabelecidas nas plantas e no próprio solo (MATOS & SEDIYAMA, 1995).

O esgoto doméstico possui quantidade significativa de N e P, que estão presentes na solução principalmente nas formas de N-orgânicos, N-amoniacais, ortofosfatos, fosfato condensados e organicamente ligados (MATOS, 2015). Como já discutido em literatura ampla, esses elementos no

ambiente aquático causam o enriquecimento do meio promovendo à proliferação da flora aquática, conseqüentemente, a eutrofização do corpo receptor com a redução do oxigênio dissolvido (OD).

Para o desenvolvimento das plantas, é necessário que haja a disponibilidade dos macronutrientes, principalmente N, P e K. Nessa perspectiva, a utilização de água residuária doméstica pode ser fonte de nutrientes a serem aportados às culturas (KIHILA *et al.*, 2014). Assim, as rampas de escoamento aliam tecnologia que consegue reduzir as concentrações desses elementos pelo aporte das plantas e depuração no meio.

No que se refere ao aumento da produtividade em culturas, as evidências indicaram direta relação com o fornecimento de nutrientes presentes no esgoto doméstico (SOUSA *et al.*, 2015) e aumento na atividade microbiológica do solo (SIMÕES *et al.*, 2013).

As espécies vegetais indicadas para o método de tratamento em rampas de escoamento superficial são geralmente as gramíneas, principalmente as rústicas, com características perenes, resistentes às condições de baixa oxigenação e alta salinidade em nível radicular, elevada capacidade de extração de nutrientes, resistente a ataques de pragas, e que permitam podas sucessivas e frequentes (TONETTI *et al.*, 2009).

Em rampas de escoamento superficial podem existir problemas estruturais, o que seria resultado de uma implantação inadequada. Exemplos desses problemas podem ser uma má compactação, um plantio ineficiente ou uma superfície desnivelada, tendo como resultado formação de caminhos preferenciais do fluxo, produção vegetal desigual ou, em casos extremos, a perda de eficiência no tratamento. Sendo assim, ferramentas espaciais podem ser um bom apoio para avaliar o funcionamento das rampas.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar espacialmente as características químicas do solo, a extração de nutriente e a produtividade da *Brachiaria humidicula* cultivada em rampa de escoamento superficial no tratamento de esgoto doméstico gerado no município de Januária-

MG, em uma estação de tratamento operando em condições reais.

MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) doméstico da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA), no município de Januária, localizada na latitude 15°28'55" S e longitude 44°22'41" W, altitude de 474 m e clima Aw (tropical úmido com inverno seco e verão chuvoso) de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, tipo de solo Latossolo vermelho-amarelo distrófico (UFV *et al.*, 2010). A precipitação, a umidade relativa e a temperatura média anual são 850 mm, 60% e 27 °C, respectivamente (JACOMINE *et al.*, 1979). A ETE recebe esgoto de aproximadamente 17 mil habitantes, o que gera uma vazão afluente de aproximadamente 28 m³ h⁻¹.

A ETE apresenta um sistema de tratamento constituído por tratamento preliminar (gradeamento e desarenador), sucedido por um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA) seguido de Rampa de Escamento Superficial. Neste experimento, utilizou-se uma rampa de escoamento superficial cultivado com braquiária (*Brachiaria humidicula*), como pode ser observado na Figura 1. A rampa possui 42 m de largura, 48 m de comprimento e 5% de declividade, sendo dotada de uma canaleta de distribuição no início, para promover uniformidade na aplicação do efluente, e uma canaleta no final,

para coleta do efluente tratado conduzido para disposição final no rio São Francisco. A rampa recebe o efluente oriundo do RAFA de forma independente e operaram intermitentemente, garantindo, assim, um período de descanso.

A coleta das amostras foi realizada no dia 22 de outubro/2013, até esse período a gramínea estava com pouco mais de um ano de cultivo na área. A precipitação em Januária antes da coleta das amostras e desde o início do período chuvoso, que se deu em setembro, foi de 70,9 mm, com chuvas fracas, com máxima de 24,3 mm no dia 8 de outubro/2013, de acordo com os dados meteorológicos do INMET (2013).

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados de algumas análises físicas, químicas e biológicas realizadas pela COPASA no esgoto afluente e efluente da estação de tratamento em períodos de amostragem bimestral e na Tabela 2 estão os resultados de algumas análises químicas do esgoto efluente, realizadas semestralmente.

Para a avaliação da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo na rampa, foram amostrados 24 pontos distribuídos de forma sistematizada na camada de 0 - 20 cm, com o auxílio de um trado holandês, como pode ser notado na Figura 2. Nos mesmos pontos de coleta de solo foram coletadas, com auxílio de um utensílio cortante, amostras de tecido vegetal em uma área útil de 0,25 m², delimitada por um quadrado amostral de 0,5 x 0,5 m.



(a)



(b)

Figura 1. Reator anaeróbico de fluxo ascendente (a), e rampa de escoamento superficial (b).

Tabela 1. Características químicas do afluente e efluente da estação de tratamento de esgoto da COPASA de Januária-MG.

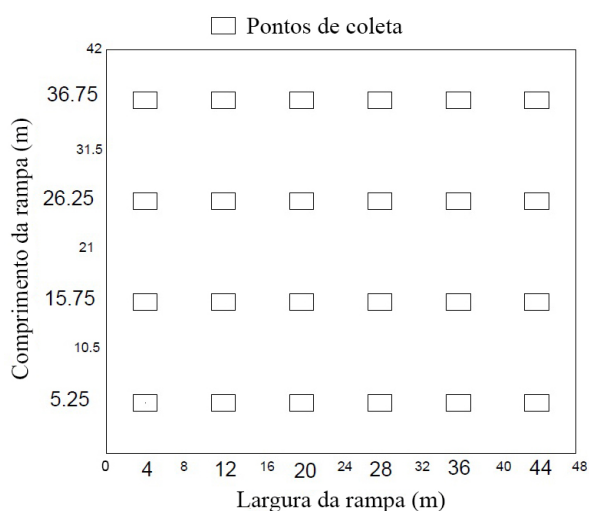
Análises Bimestrais	Un.	Coleta das amostras				
		28/Jan	25/Mar	06/Abr	03/Jul	19/Set
Condutividade elétrica efluente	$\mu\text{S m}^{-1}$	6,42	5,90	8,82	10,02	8,68
DBO afluente	mg L^{-1}	91,50	83,00	124,00	182,00	244,00
DBO efluente	mg L^{-1}	12,60	11,70	15,60	21,10	17,60
DQO afluente	mg L^{-1}	274,00	196,00	171,00	432,00	610,00
DQO efluente	mg L^{-1}	37,00	39,00	37,90	84,00	53,60
<i>Escherichia coli</i> efluente	NMP	$1,0 \times 10^6$	$8,1 \times 10^6$	$2,0 \times 10^5$	$1,0 \times 10^5$	$1,0 \times 10^5$
pH efluente	-	7,38	7,67	7,54	7,70	7,73
Sólidos Sedimentáveis afluente	ml L^{-1}	11,00	1,20	8,90	19,00	18,00
Sólidos Sedimentáveis efluente	ml L^{-1}	0,40	< 0,1	< 1,0	0,70	0,10
Vazão média mensal afluente	L s^{-1}	8,38	7,42	7,68	7,81	8,19
Vazão média mensal efluente	L s^{-1}	6,70	5,94	6,52	6,63	6,97

NMP - Número Mais Provável; Análises realizadas em 2013. Fonte: Relatório técnico da ETE/COPASA de Januária-MG, 2014.

Tabela 2. Características químicas do efluente da estação de tratamento de esgoto da COPASA de Januária-MG.

Análises Semestrais	Un.	Coleta das amostras	
		25/Mar	19/Set
Cloreto total	mg L^{-1}	32,90	57,00
Fósforo total	mg L^{-1}	0,28	1,00
Nitrato	mg L^{-1}	5,60	0,90
Nitrogênio amoniacal total	mg L^{-1}	8,50	30,00
Óleos e graxas	mg L^{-1}	4,60	5,40
Agentes tensoativos	mg L^{-1}	0,47	0,17

Análises realizadas em 2013. Fonte: Relatório técnico da ETE/COPASA de Januária-MG, 2014.

**Figura 2.** Croqui dos pontos de coleta da amostra de tecido vegetal e solo nas rampas de escoamento superficial.

A análise estatística foi feita adotando-se um delineamento inteiramente casualizado (DIC), partindo-se do princípio de que cada faixa de comprimento avaliada se tratava de um tratamento e cada ponto amostral ao longo da largura da rampa uma repetição, obtendo-se assim, quatro tratamentos com seis repetições cada.

No laboratório de solos do Instituto Federal do Norte de Minas Gerais, Campus Januária, as amostras de solo e tecido vegetal foram imediatamente pesadas e secas em estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 105 e 65 °C, respectivamente, determinando a produtividade de matéria seca da gramínea em função da área amostral. Parte da amostra vegetal seca foi triturada em moinho tipo *wiley*, para realização das análises químicas.

Nas amostras de solo secas ao ar e peneiradas em peneira de 2,0 mm, determinou-se os teores de Fe, Zn, Cu, Mn, Ca e Mg, por espectrofotometria de absorção atômica; os de K e Na, por fotometria de chama, e o de P e a MO, pelo método colorimétrico (DONAGEMA *et al.*, 2011). Os extratores utilizados foram os recomendados pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG) apresentados em Ribeiro *et al.* (1999). Para a determinação da razão de adsorção de sódio (RAS) e porcentagem de sódio trocável (PST), foram adotadas as equações citadas por Matos *et al.* (2014).

Nas amostras do tecido vegetal, determinou-se os teores de N pelo método semi-micro Kjeldahl; o de K, por fotometria de chama, e o de P, pelo método colorimétrico do ácido ascórbico com

leitura em espectrofotômetro (EMBRAPA, 1999). Foram gerados mapas temáticos para analisar a variabilidade espacial dos atributos estudados, utilizando krigagem no software Surfer 12 versão Demo (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A *B. humidicula*, apesar da elevada produtividade de matéria fresca e seca, apresentou grande variação dos resultados, como pode ser notado na Tabela 3.

A produtividade de matéria fresca variou de 45 t ha⁻¹ a valores superiores a 145 t ha⁻¹ (Figura 3), essa variação pode indicar possíveis caminhos preferenciais do esgoto dentro das rampas. A produtividade de matéria seca variou de 7 t ha⁻¹

Tabela 3. Características químicas do solo, com médias para os quatro comprimentos ao longo da rampa cultivada com *Brachiaria humidicula* na estação de tratamento de esgoto da COPASA em Januária-MG.

Características do solo	Comprimento da rampa (m)				Mediana	CV (%)
	5,25	15,75	26,25	36,75		
Matéria Fresca (t ha ⁻¹)	65,6 a	100,0 a	79,5 a	91,8 a	79,8	33,7
Matéria Seca (t ha ⁻¹)	11,8 a	17,7 a	12,9 a	13,3 a	13,3	32,9
pH (H ₂ O)	5,9 a	6,1 a	6,0 a	6,2 a	6,12	4,6
pH (SMP)	6,6 a	6,5 a	6,3 a	6,2 a	6,36	5,0
H+Al (cmol _c kg ⁻¹)	2,2 a	2,3 a	3,0 a	3,1 a	2,6	32,9
CE _{1,5} (dS m ⁻¹)	0,3 ab	0,1 b	0,4 a	0,4 ab	0,3	65,6
MO (dag kg ⁻¹)	3,6 b	4,5 ab	6,4 ab	9,3 a	5,3	61,8
P (mg dm ⁻³)	405,9 a	406,8 a	511,8 a	529,0 a	577,6	72,4
K (mg dm ⁻³)	14,8 b	18,5 ab	27,5 ab	40,8 a	23,9	58,8
Ca (mg dm ⁻³)	5,1 a	4,1 a	6,7 a	8,5 a	5,2	50,8
Mg (mg dm ⁻³)	0,4 a	0,3 a	0,5 a	0,6 a	0,3	57,4
Fe (mg dm ⁻³)	20,0 a	21,7 a	26,4 a	23,0 a	23,3	33,6
Zn (mg dm ⁻³)	2,7 ab	1,0 b	3,1 ab	3,4 a	2,7	56,8
Mn (mg dm ⁻³)	2,5 a	1,1 a	1,6 a	2,0 a	2,0	51,9
Cu (mg dm ⁻³)	0,3 a	0,3 a	0,4 a	0,3 a	0,3	26,4
Na (mg dm ⁻³)	8,3 a	8,7 a	15,8 a	17,5 a	12,1	62,4
RAS (mmol _c dm ⁻³)	1,0 a	1,1 a	1,6 a	1,6 a	1,0	24,0
PST (%)	3,6 a	3,0 a	3,1 a	2,3 a	2,3	18,0

* Médias seguidas por mesma letra na linha não se diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. H+Al – Acidez potencial, CE_{1,5} - Condutividade Elétrica do solo diluído em água na proporção de 1:5 volumes de água, RAS - Razão de Adsorção de Sódio, PST - Porcentagem de Sódio Trocável.

a valores maiores que $21,9 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 3), a distribuição espacial da matéria seca é um reflexo da produção da matéria fresca, sendo em média 6 vezes menor.

Os resultados de matéria seca da *B. humidicula*, cultivada com pouco mais de um ano, superou os observados por Crispim e Branco (2002) para a mesma espécie cultivada sem adubação, com intuito de formar pastagem, com crescimento durante o período de fevereiro a setembro na região do Pantanal mato-grossense. Neste estudo, os autores obtiveram os valores de 1,3, 8,5 e $9,8 \text{ t ha}^{-1}$ de matéria seca com até 2, de 5 a 10 e acima de 10 anos de plantio, respectivamente (CRISPIM & BRANCO, 2002). Diante do exposto, pode-se notar o incremento na produtividade utilizando esgoto doméstico.

Paganini (1997) e Coraucci Filho (1992), em estação de tratamento de esgoto com rampas de escoamento superficial no Estado de São Paulo, obtiveram bom desempenho agrônômico da *B. humidicula* cultivada, com produtividade maior que $30 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, esses resultados estão aliados ao número de corte do experimento.

Os valores de $\text{pH}_{\text{água}}$ variaram de 5,9 a 6,2, em função dos diferentes pontos de coleta de amostras de solo ao longo da rampa (Tabela 3), mas sempre mantendo uma faixa aceitável para vegetação, com média de 6,1, como pode ser notado na Figura 4. Em estudos realizados com aplicação de efluente de esgoto tratado em solo cultivado com milho,

Fonseca *et al.* (2005) verificaram que o aumento do pH ocorreu no início das aplicações e mais pronunciadamente ao final do experimento. No solo, os valores de pH podem variar de acordo com as condições de alcalinidade com que o efluente chega na ETE.

Os índices de pH das amostras de solo foram inferiores ao de pH do efluente recebido pela ETE, em média 7,6 ao longo do período amostrado (Tabela 1). Esse valor está dentro do intervalo compreendido entre 6,0 e 9,5, considerado como efluente em boas condições para disposição no solo (MATOS, 2007).

Os teores de MO no solo foram maiores nos comprimentos da rampa de 26,25 e 36,75 m, com valores de 6,4 e $9,3 \text{ dag kg}^{-1}$, respectivamente, nos comprimentos anteriores, os teores caíram para 3,6 e $4,5 \text{ dag kg}^{-1}$ (Tabela 3). De acordo com Ribeiro *et al.* (1999), os teores de MO são considerados altos quando são superiores a $4,5 \text{ dag kg}^{-1}$. Altos teores de MO são comuns em sistemas de tratamento por disposição no solo, devido à alta carga de componentes orgânicos no efluente proveniente da ocupação urbana (VON SPERLING, 2005).

Em toda a área da rampa cultivada com braquiária os teores de MO foram superiores a $3,0 \text{ dag kg}^{-1}$ (Figura 4). Os maiores valores encontrados no comprimento 36,75 m podem estar associados ao início de senescência da gramínea nessa região.

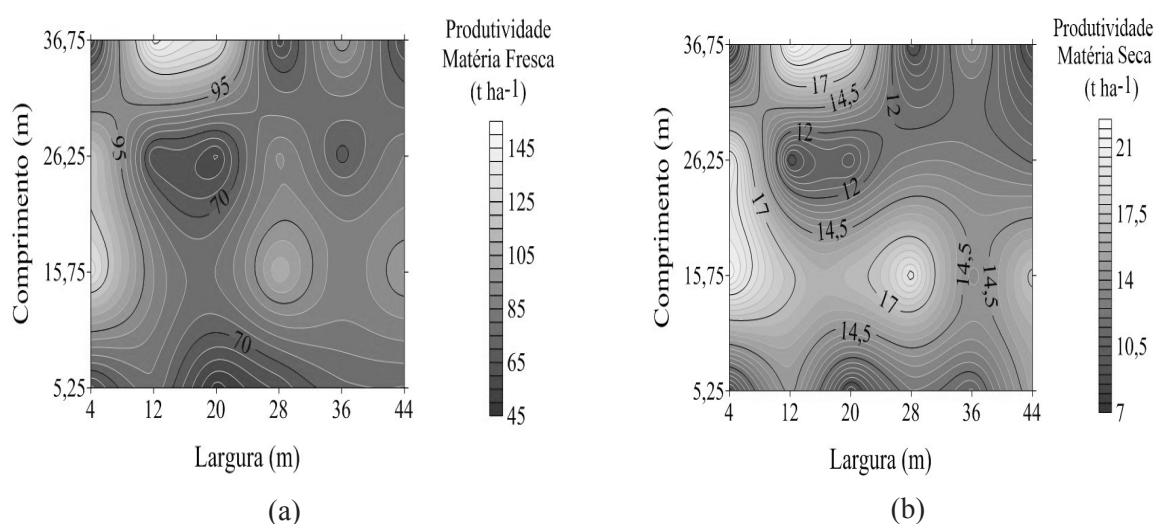


Figura 3. Produtividade de matéria fresca (a) e seca (b) ao longo da rampa de escoamento superficial cultivada com *Brachiaria humidicula*.

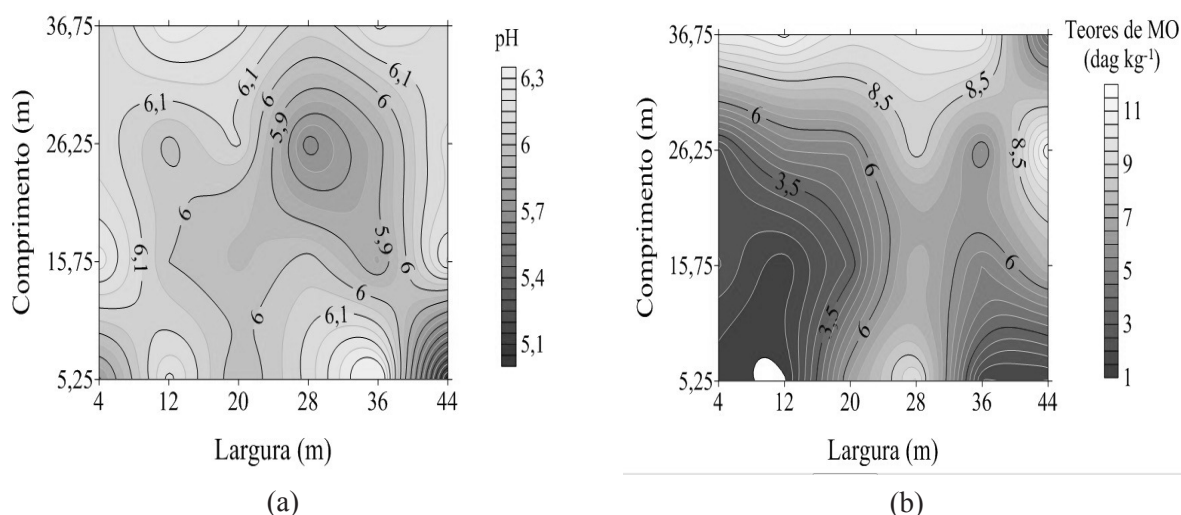


Figura 4. Valor do potencial hidrogeniônico (pH) (a) e matéria orgânica (MO) (b) do solo ao longo da rampa de escoamento superficial cultivada com *Brachiaria humidicula*.

Loures *et al.* (2006a) obtiveram aumento dos teores de MO em solo proveniente de rampas de escoamento superficial cultivado com capim *coast cross* utilizando diferentes taxas de aplicação de esgoto doméstico. Os autores também observaram que aumento no teor de MO também foi observado no tratamento testemunha (tratamento sem aplicação de AR), que passou de 1,04 dag kg⁻¹ para 2,07 dag kg⁻¹, demonstrando que a forragem cultivada nas rampas contribui para aumentar o teor de MO do solo.

As concentrações de P no solo apresentaram valores elevados, variando de 17,32 a 1032,04 mg dm⁻³, com mediana de 577,6 mg dm⁻³ (Tabela 3). Rheinheimer *et al.* (2003) mostraram em seus estudos que um latossolo vermelho distroférico típico pode chegar a adsorver cerca de 1200 mg dm⁻³, na camada de 0 - 20 cm.

O efluente da rampa apresentou concentração média de 0,64 mg L⁻¹ de P, o que representou uma remoção de 42,3%, valor superior aos encontrados por Loures *et al.* (2006b), que, avaliando a remoção de P em diferentes distâncias percorridas em rampas de tratamento de efluente doméstico, obtiveram remoções de 2,19; 8,69; 2,48 e 10,63 % para as distâncias de 4, 6, 8 e 10 m, respectivamente.

Apesar da baixa eficiência na remoção de P do esgoto doméstico pelas rampas de escoamento, valores variando de 10 a 40 %, a elevada frequência de aplicação e a baixa mobilidade do P no solo

podem ter contribuído para o seu maior acúmulo no sistema. Pode-se observar na largura entre 20 e 28 m, um caminho onde se encontram as maiores concentrações de P (Figura 5).

Segundo Matos (2007), além da absorção e remoção pela vegetação, existem vários mecanismos de remoção de P do solo, como adsorção ao solo, principal mecanismo de remoção se tratando de solo intemperizado, precipitação química e imobilização química na forma de compostos orgânicos na camada de lodo biológico.

A maior frequência de corte na vegetação aumenta a remoção do elemento P do sistema (TONETTI *et al.*, 2009). O P como um macronutriente essencial para o metabolismo da vegetação durante seu desenvolvimento estaria em menores concentrações caso a remoção da massa vegetal do sistema fosse feita sistematicamente. De acordo com a Tabela 3, houve um acúmulo crescente de P no solo, do início para o fim da rampa de escoamento, o que também foi observado para o K.

Comparando-se os mapas de P e K, nota-se uma tendência similar nas larguras de 20 a 28 m, onde se encontram as maiores concentrações, podendo indicar um possível caminho preferencial do efluente (Figura 5).

A passagem da forma de K trocável para a não trocável pode ocorrer rapidamente, de acordo com a concentração do K na solução do solo, fazendo

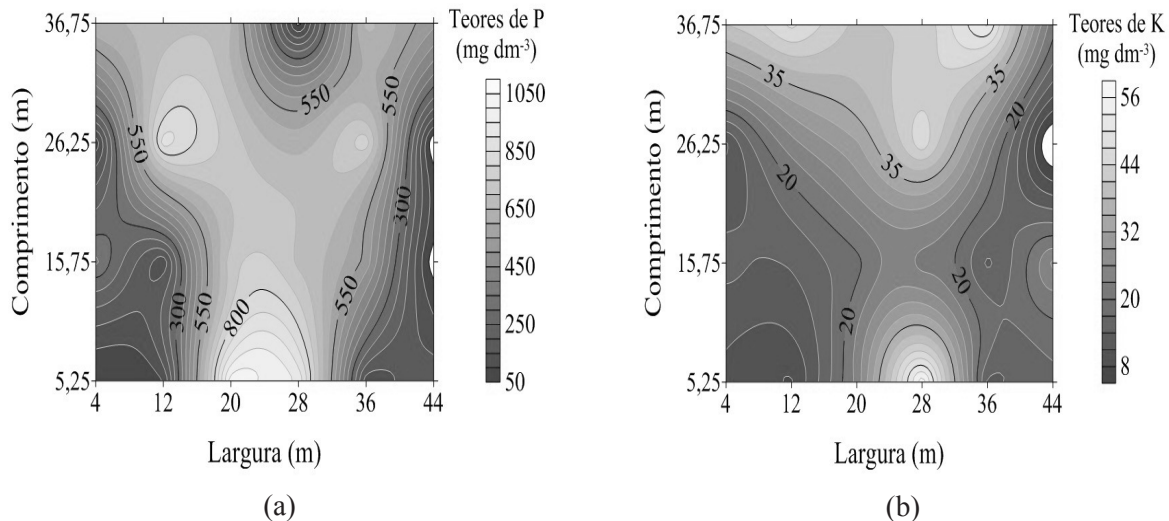


Figura 5. Valor de fósforo (P) e potássio (K) no solo ao longo da rampa de escoamento superficial cultivada com *Brachiaria humidicula*.

que perdas por lixiviação de formas inicialmente disponíveis sejam possíveis devido à capacidade natural do solo em encontrar o equilíbrio (ROSOLEM *et al.*, 2006).

Queiroz *et al.* (2004a) consideram valores acima de 79 mg dm^{-3} como sendo valores altos para o K em solo. Na rampa o valor máximo médio do K não ultrapassou $40,8 \text{ mg dm}^{-3}$, tendo a mediana ($23,9 \text{ mg dm}^{-3}$) como baixo valor segundo a classificação de Alvarez *et al.* (1999). Esses valores podem ser justificados pelo parágrafo anterior, pois o K pode estar sendo lixiviado junto ao fluxo do esgoto doméstico.

O Na se comporta como K no solo, estando presente em concentrações consideráveis no esgoto sanitário. Em sistemas de tratamento por rampa de escoamento superficial, a elevada taxa de aplicação e a alta mobilidade do Na desfavoreceram seu acúmulo no solo, portanto, um elemento pouco removido nesse sistema de tratamento.

Cátions monovalentes possuem elevado raio hidratado, podendo causar dispersão da argila, este fenômeno é prejudicial ao sistema solo-planta, pois contribui para a formação de uma camada impermeável que diminui drasticamente a infiltração da água no solo e desfavorece as trocas gasosas e o desenvolvimento radicular (MATOS, 2010). O potencial de dispersão da argila no solo é influenciado pelo tipo de solo, mas principalmente pela relação do íon Na com os demais cátions

presentes no solo, como Al^{3+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} (ASSIS JÚNIOR & SILVA, 2012).

Os teores de Na no solo da rampa cultivada com *B. humidicula* variaram de $0,77$ a $1,59 \text{ mmol dm}^{-3}$ ao longo dos comprimentos avaliados, o que, aliado aos teores dos demais cátions presentes no solo, resultou em RAS de $0,4$ a $1,9$ (mmol dm^{-3}) e PST de $2,3$ a $3,6\%$ (Tabela 3). De acordo com a classificação do Laboratório de Salinidade dos EUA, valores de PST superiores a 15% representam danos ao sistema solo-planta (RICHARDS, 1954). Assim, os resultados de PST obtidos no solo das rampas de tratamento de esgoto ainda não representam danos ao sistema. Contudo, recomenda-se o monitoramento periódico.

As concentrações de Na no solo com braquiária foram maiores no final da rampa, o que resultou no mesmo comportamento da RAS e PST (Figura 6). Pode-se notar que na faixa de 28 a 44 m houve um maior acúmulo de Na.

Águas residuárias, por apresentarem considerável salinidade, diminuem os riscos de dispersão de argila com a prática de disposição no solo (MATOS, 2007). De acordo com a Tabela 3, a $\text{CE}_{1,5}$ teve baixa variação nos comprimentos da rampa com exceção do comprimento de $15,75 \text{ m}$, onde esse valor foi de $0,1 \text{ dS m}^{-1}$. Podendo ser confirmado pela Figura 6.

Dentre os micronutrientes analisados, o Fe apresentou os maiores teores no solo, com mediana

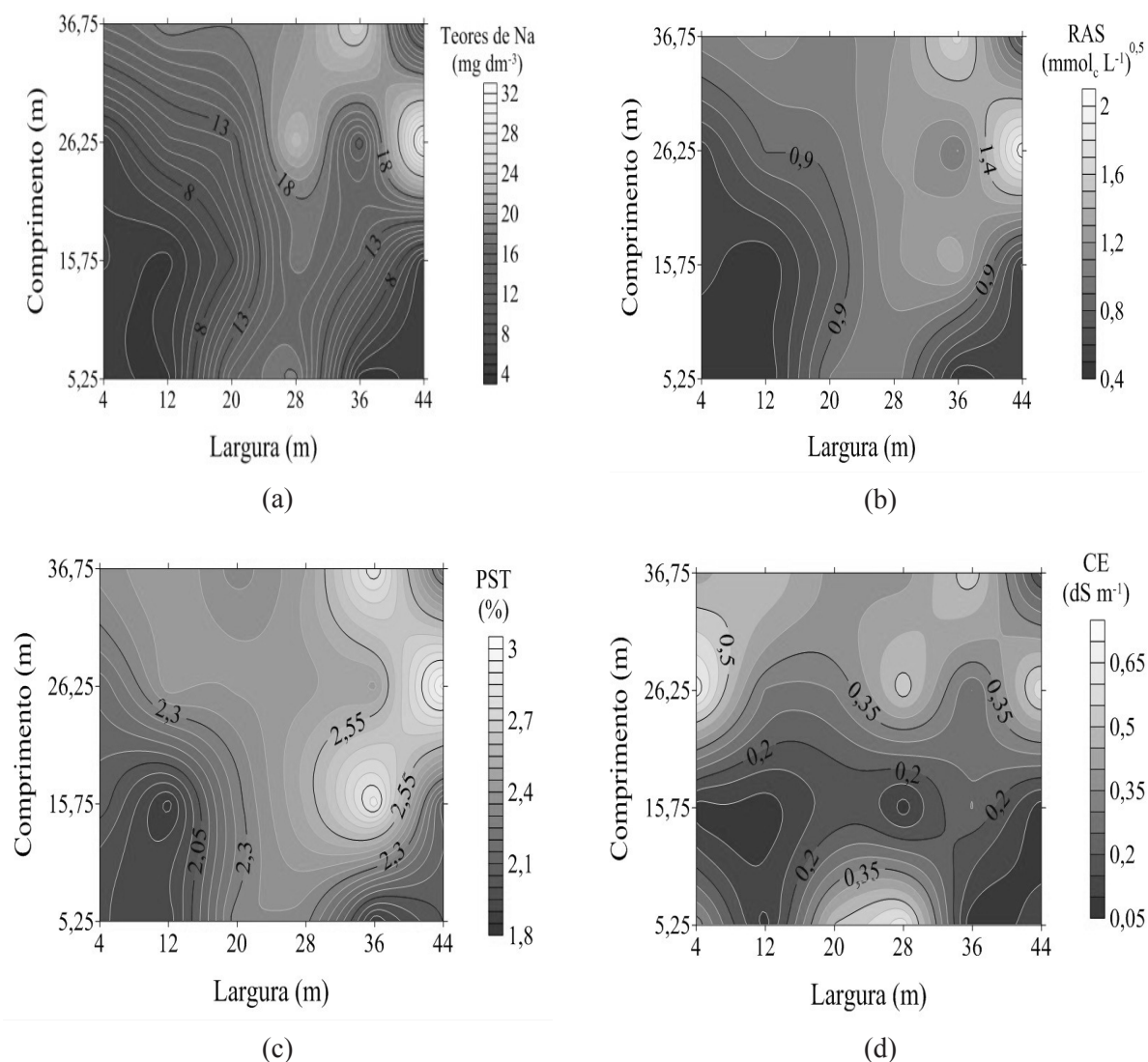


Figura 6. Valor do teor de sódio (Na) (a), razão de absorção de sódio (RAS) (b), porcentagem de sódio trocável (PST) (c) e condutividade elétrica (CE) (d) no solo ao longo da rampa de escoamento superficial cultivada com *Brachiaria humidicula*.

de $23,3 \text{ mg dm}^{-3}$ (Tabela 3). Santos *et al.* (2016), em experimento com aplicação de água residuária sanitária (ARS) em algodoeiro, verificaram teores similares na camada de 0-20 cm do solo com teores médios de $20,0$ e $20,1 \text{ mg dm}^{-3}$ de Fe. Kiziloglu *et al.* (2008) afirmaram que a aplicação de água residuária sanitária bruta (ARB) geralmente aumenta o conteúdo de Fe no solo.

O teor de Mg no solo cultivado com *B. humidicula*, para os comprimentos avaliados, não ultrapassou $0,3 \text{ mg dm}^{-3}$ (Tabela 3). Solos com teores de Mg menores que $5,4 \text{ mg dm}^{-3}$ são considerados como solos de baixa fertilidade (RIBEIRO *et al.*, 1999). Os teores de Mg variaram pouco em todos os comprimentos de rampa, como

pode ser constatado pela Figura 7.

Os teores de Cu foram menores no comprimento de 5,25 m da rampa, com mediana de $0,3 \text{ mg dm}^{-3}$, apresentando leve aumento no comprimento de 26,25 m, onde a média foi de $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ (Figura 7), mas não apresentando diferença significativa entre os comprimentos. Muitos são os fatores que afetam a dinâmica do Cu no solo, como a composição química, física, mineralógica, a quantidade de M.O e a condição do pH do solo (Mc BRIDE *et al.*, 1997). Tais concentrações de Cu no solo podem ser tidas como muito baixas por serem menores que $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ (ALVAREZ *et al.*, 1999). Os valores de Zn e Mn apresentaram medianas de $2,7$ e $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente (Tabela 3), ambos

apresentaram maior concentração no comprimento final da rampa, o que também acontece com a distribuição de Ca (Figura 7).

O Cu, por estar em baixas concentrações no esgoto doméstico, não foi capaz de alterar

significativamente as concentrações no solo. O mesmo ocorre para Zn, Mn e Fe, fato já discutido por Rusan *et al.* (2007), que observou as alterações químicas do solo na aplicação de esgoto doméstico por 10 anos.

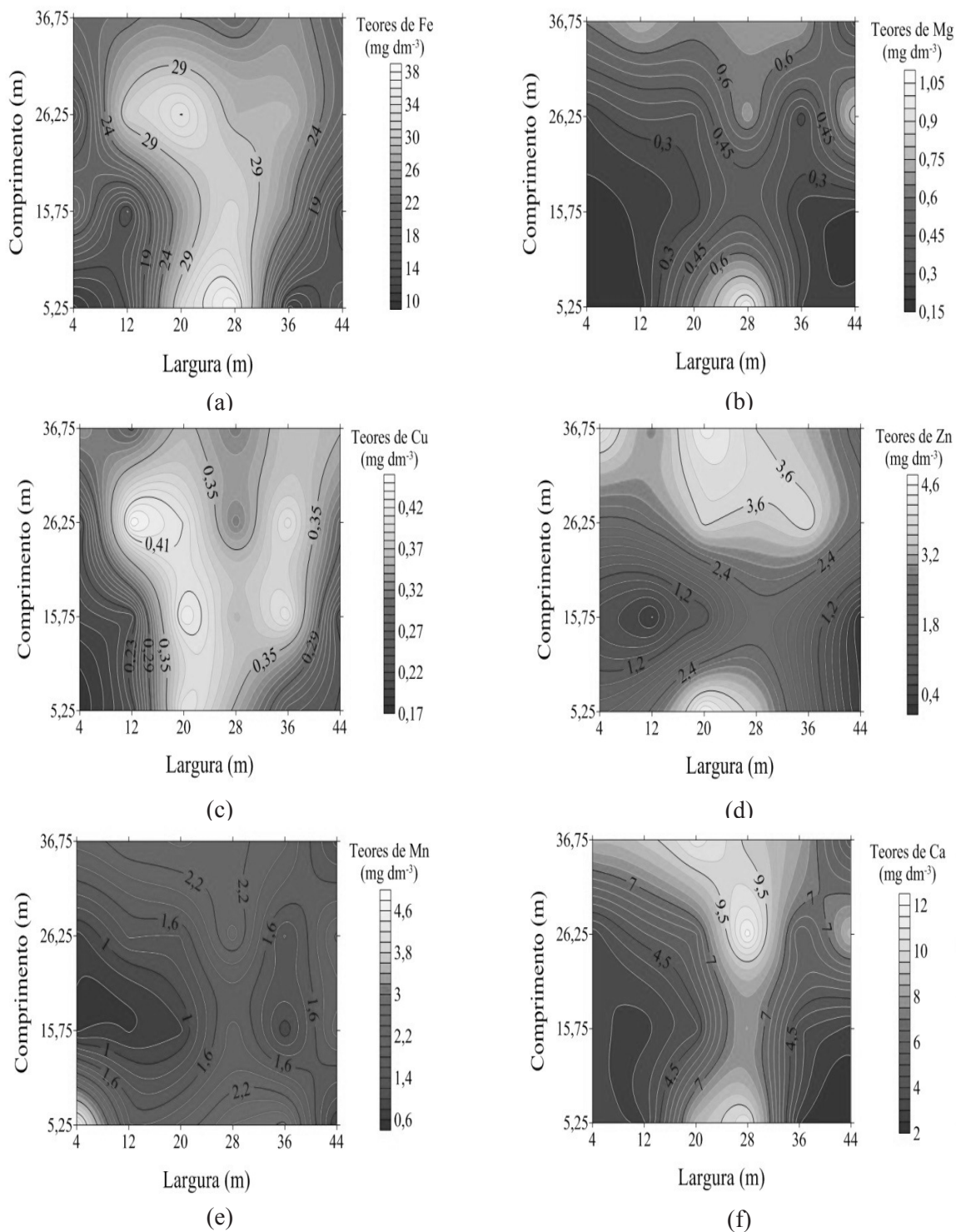


Figura 7. Teor de ferro (Fe) (a), magnésio (Mg) (b), cobre (Cu) (c), zinco (Zn) (d), manganês (Mn) (e) e cálcio (Ca) (f) no solo ao longo da rampa de escoamento superficial cultivada com *Brachiaria humidicula*.

De maneira geral, grande parte dos elementos apresentaram maior acúmulo na região central e ao final da rampa em relação à região periférica e do início da rampa, isso pode ser considerado um forte indicativo de presença de caminho preferencial. O aumento na parte final das rampas pode ser indicativo de uma possível colmatção da região inicial por receber uma maior carga orgânica aplicada, o que resulta em uma menor infiltração, logo, uma baixa adsorção destes elementos nessa região.

A remoção de nutrientes pela *Brachiaria humidicula* cultivada na rampa de escoamento obteve resultados significativos. Na tabela 4 estão apresentados os valores médios de remoção dos macronutrientes (N, P e K) ao longo dos comprimentos de rampa.

De maneira geral, o segundo comprimento (15,75 m) de rampa foi onde se obteve os maiores valores médios de remoção dos macronutrientes estudados (Tabela 4), apresentando diferença significativa apenas para o potássio.

Como já foi observado pelas análises de solo, o primeiro trecho das rampas foi onde se teve o menor teor de nutrientes, reafirmado a ideia de que a carga orgânica recebida no início da rampa pode estar colmatando essa região, fazendo com que se tenha uma disponibilidade maior de nutrientes nos comprimentos de rampa seguinte.

Sendo assim, a remoção de nutrientes pelas plantas, por estar diretamente ligada com a disponibilidade dos mesmos no solo, respondeu em função dos teores de nutrientes apresentados na área, justificando as maiores remoções nos trechos seguintes.

Outra justificativa para uma maior remoção no segundo trecho em diante pode estar ligada a uma melhor formação das plantas naquele local, ou seja, maior número de plantas por área e maior tamanho de plantas, que reflete em uma maior produtividade.

A remoção de P foi de, em média, 64,58 kg ha⁻¹ (Tabela 4), o valor encontrado foi aproximado ao proposto por Queiroz *et al.* (2004b), onde, para uma braquiária (cultivar desconhecido), foi de 59,45 kg ha⁻¹, em estudo realizado com água residuária da suinocultura aplicado em rampas de escoamento superficial. Nazário *et al.* (2014) corroboraram com este estudo, avaliando a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu cultivada em rampas de escoamento recebendo esgoto doméstico, chegando a uma remoção em dois cortes de 54 kg ha⁻¹ de P.

Observando os valores de K removidos pela braquiária, obteve-se uma média de 431,8 kg ha⁻¹, com maior coeficiente de variação (Tabela 4). O valor de remoção de K da braquiária está acima dos encontrados por outras forrageiras, como a do capim-coast cross, que, segundo Burns *et al.* (1985), chega a 380 kg ha⁻¹.

Para o N se obteve uma remoção média de 357,1 kg ha⁻¹, valor abaixo do encontrado por Nazário *et al.* (2014) para dois cortes, que ultrapassou 500 kg ha⁻¹. Cabe ressaltar que essa diferença está ligada ao número de cortes.

O baixo valor do coeficiente de variação do N e P (Tabela 3), é resultado da baixa variabilidade espacial desses atributos, como pode ser notado na Figura 14. Em contra partida, o K apresentou uma variabilidade espacial maior na área amostral, com valores variando de 150 a 950 kg ha⁻¹ (Figura 14).

Tabela 4. Remoção média de nutrientes por comprimento de rampa.

Nutrientes kg ha ⁻¹	Comprimento de rampa (m)				Média	CV (%)
	5,25	15,75	26,25	36,75		
Nitrogênio	283,4 a	430,2 a	344,1 a	370,6 a	357,1	17,06
Fósforo	49,4 a	77,4 a	62,9 a	68,6 a	64,6	18,21
Potássio	275,6 a	545,4 b	400,4 ab	505,8 ab	431,8	27,97

* Médias seguidas por mesma letra na linha não se diferem estatisticamente pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. CV - Coeficiente de variação.

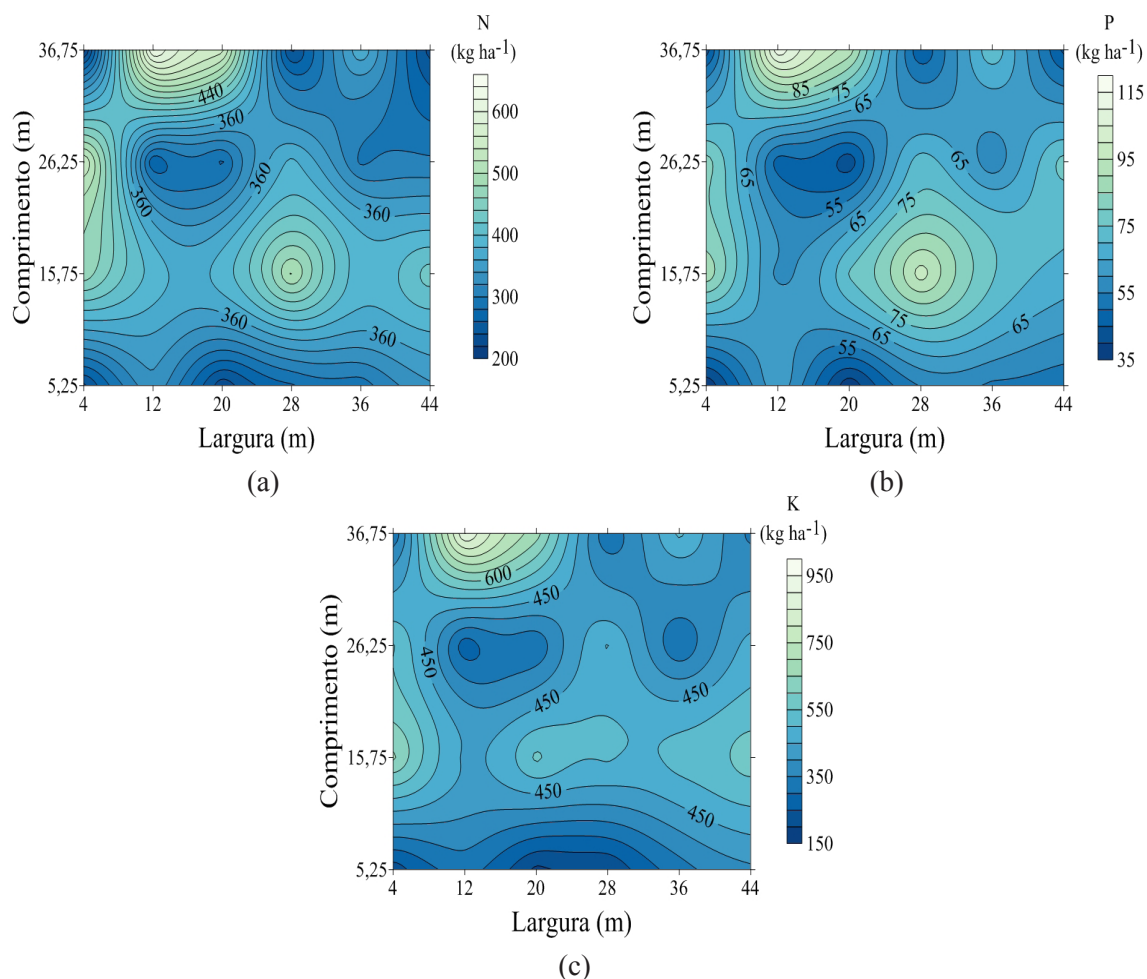


Figura 14. Remoção de Nitrogênio (N) (a), Fósforo (P) (b) e Potássio (K) (c) por *Brachiaria humidicula* ao longo da rampa de escoamento superficial.

CONCLUSÕES

- Observou-se uma alta variação na distribuição dos nutrientes no solo ao longo da rampa de escoamento superficial, atingindo diferenças significativas para MO, K e Zn, que aumentaram suas concentrações a medida que aumentava-se o comprimento de rampa. Muitos elementos químicos apresentaram distribuição espacial semelhante, indicando, assim, um caminho preferencial entre a largura 20 e 36 m.
- A produtividade da *Brachiaria humidicula* apresentou média que superou 100 e 17 t ha⁻¹ de matéria fresca e seca, respectivamente, no segundo comprimento de rampa. Esses valores seriam facilmente superados, caso a cultura

tivesse recebido mais cortes.

- A remoção de N, P e K pela *Brachiaria humidicula* foi satisfatória, se comparado com os dados encontrados na literatura, estando limitada pelo número de cortes. Os maiores valores de remoção foram no segundo comprimento de rampa, como consequência da produtividade. Podem-se aliar esses valores a uma possível colmatação do primeiro comprimento de rampa.
- A avaliação espacial se mostrou uma ferramenta adequada para investigar possíveis alterações no sistema de rampas, podendo ser usada para auxiliar nas tomadas de decisões, principalmente em casos de rampas com maiores tempos de uso que necessitem ser reformadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F.; CANTARUTTI, R.B.; LOPES, A.S. Interpretação dos resultados de análises de solos. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5ª aproximação)*. Viçosa: UFV, 1999, p.25-36.
- ASSIS JÚNIOR, R.N.; SILVA, E.F. Efeito da qualidade da água de irrigação sobre os atributos físicos de um Neossolo Flúvico do município de Quixeré, CE - Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.1778-1786, 2012.
- BURNS, J.C., WESTERMAN, P.W., KING, L.D., CUMMINGS, G.A., OVERCASH, M.R., GOODE, L. Swine lagoon effluent applied to 'Coastal' Bermudagrass: 1. Forage yield, quality, and element removal. *Journal of Environmental Quality*, v.14, n.1, p.9-14, 1985.
- CORAUCCI FILHO, B. Tratamento do esgoto doméstico no solo pelo método do escoamento superficial. 1992. 867f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em engenharia civil, USP, São Paulo, 1992.
- CRISPIM, S.M.A.; BRANCO, O.D. Aspectos gerais das braquiárias e suas características na sub-região da Nhecolândia, Pantanal - MS. *Embrapa Pantanal. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, 2002.
- DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B.; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (org.). *Manual de métodos de análises de solos*. 2 ed. Revisada. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2011. 230p.
- EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Comunicação para Transferência de Tecnologia*, Brasília, Brasil, 1999, 370p.
- FONSECA, A.F. ; MELFI, A.J. ; MONTES, C.R. Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. II. Soil acidity, exchangeable cations, and sulfur, boron, and heavy metals availability. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.36, n.13 e 14, p.1983-2003, 2005.
- FONSECA, S.P.P; SOARES, A.A. Efficacy evaluation sewage treatment system by overland flow, implanted after septic tank. In: 8TH International Symposium on Sanitary and Environmental Engineering, 2008, Florença, Itália. *Anais... AIDIS*, 2008.
- GOLDEN SOFTWARE Surfer version 12 - Feb. 11 2002. Surface mapping system. Colorado: Golden Software, Inc, 1993-2002. 1 CD-ROM.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília-DF. Disponível em www.inmet.gov.br, acessado em 05/11/2013.
- JACOMINE, P.K.T.; CAVALCANTI, A.C.; FORMIGA, R.A.; SILVA, F.B.R.; BURGOS, N.; MEDEIROS, L.A.R.; LOPES, O.P.; MELO FILHO, H.R.L.; PESSOA, S.G.P.; LIMA, P.C. Levantamento exploratório: reconhecimento de solos do Norte de Minas Gerais - área de atuação da Sudene. Recife: EMBRAPA-SNLCS/ SUDENE-DRN, 1979. p.10-15.
- KIHILA, J.; MTEI, K.M.; NJAU, K.N. Wastewater treatment for reuse in urban agriculture; the case of Moshi Municipality, Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.72, n.75, 2014, p.104-110.
- KIZILOGLU, F.M.; TURAN, M.; SAHIN, U.; KUSLU, Y.; DURSUN, A. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. *Agricultural Water Management*, v.95, p.716-724, 2008.
- LOURES, A.P.S.; SOARES, A.A.; MATOS, A.T.; CECON, P.R.; PEREIRA, O.G. Concentração

de matéria orgânica em sistema de tratamento de esgoto doméstico por escoamento superficial. In: XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola (CONBEA), 2006, João Pessoa. Anais... XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2006a.

LOURES, A.P.S.; SOARES, A.A.; MATOS, A.T.; CECON, P.R.; PEREIRA, O.G. Remoção de fósforo em sistema de tratamento de esgoto doméstico, por escoamento superficial. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online), v.10, p.706-714, 2006b.

MATOS, A.T. Disposição de águas residuárias no solo. Engenharia na agricultura: Caderno Didático 38. Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Agrícola – UFV, Viçosa – MG. 2007. 138p.

MATOS, A.T. Manual de análises de resíduos sólidos e águas residuárias. Viçosa, Editora UFV, 2015, 149p.

MATOS, A.T. Poluição ambiental: Impactos no meio físico. Viçosa, Editora UFV, 2010. 260p.

MATOS, A.T.; ALMEIDA NETO, O.B.; MATOS, M.P. Saturação do complexo de troca de solos oxidicos com sódio. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, p.501-506, 2014.

MATOS, A.T.; SEDIYAMA, M.A.N. Riscos potenciais ao ambiente pela aplicação de esterco líquido de suínos ou compostos orgânicos no solo. In: SEMINÁRIO MINEIROS SOBRE MANEJO E UTILIZAÇÃO DE ESTERCO LÍQUIDO DE SUÍNOS, 1995, Ponte Nova. Anais... Viçosa, MG: EPAMIG, 1995. p.45-54.

Mc BRIDE, M.B.; SAUVÉ, S.; HENDERSHOT, W. Solubility control of Cu, Zn, Cd e Pb in contaminated soils. European Journal of Soil Science, Oxon, v.48, n.2, p.337-346, 1997.

MILEN, L.C. Tratamento de esgoto doméstico pelo método de escoamento superficial no solo:

uma revisão de literatura. Revista Verde, Pombal - PB - Brasil, v.9, n.5, p.26-33, 2014.

NAZÁRIO, A.A.; GARCIA, G.O.; REIS, E.F.; MENDONÇA, E.S.; MELLINE, J.G.B. Acúmulo de nutrientes por forrageiras cultivadas em sistema de escoamento superficial para tratamento de esgoto doméstico. Revista Ambiente e Água, v.9, n. 1, p. 97-108, 2014.

PAGANINI, W.S. Disposição de esgotos no solo (escoamento à superfície). Fundo editorial da AESABESP. São Paulo, 1997. 232p.

QUEIROZ, F.M.; MATOS, A.T.; PEREIRA, O.G.; OLIVEIRA, R.A. Características químicas de solo submetido ao tratamento com esterco líquido de suínos e cultivado com gramíneas forrageiras. Ciência Rural, Santa Maria, v.34, n.5, p.1487-1492, 2004a.

QUEIROZ, F.M.; MATOS, A.T.; PEREIRA, O.G.; OLIVEIRA, R.A.; LEMOS, A.F. Características químicas do solo e absorção de nutrientes por gramíneas em rampas de tratamento de águas residuárias da suinocultura. Engenharia na Agricultura, Viçosa, v.12, n.2, p.77-90, 2004b.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, n.1, p.41-49, 2003.

RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação. Viçosa, MG, 1999. 359p.

RICHARDS, L.A. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington, D. C. United States Salinity Laboratory, 1954, 160p.

ROSOLEM, C.A.; SANTOS, F.P.; FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. Potássio no solo em consequência da adubação sobre a palha de milho e chuva simulada. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.41, p.1033-1040, 2006.

RUSAN, M.J.M.; HINNAWI, S.; ROUSAN, L. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *Desalination*, v.215, 2007, p.143-152.

SANTOS, S.R.; SOARES, A.A.; KONDO, M.K.; ARAUJO, E.D.; CECON, P.R. Crescimento e produção do algodoeiro fertirrigado com água residuária sanitária no semiárido de minas gerais. *Irriga Botucatu*, v.21, p.40-54, 2016.

SIMÕES, K.S.; PEIXOTO, M.F.S.P.; ALMEIDA, A.T.; LEDO, C.A.S.; PEIXOTO, C.P.; PEREIRA, F.A.C. Água residuária de esgoto doméstico tratado na atividade microbiana do solo e crescimento da mamoneira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.17, n.5, p.518-523, 2013.

SOUZA, D.P.; QUELUZ, J.G.T.; SILVA, A.O.; SÁNCHEZ ROMÁN, R.M.S. Influência da fertirrigação por sulco utilizando água residuária e diferentes níveis de adubação na produtividade

do feijoeiro. *Irriga Botucatu*, v.20, n.2, p.348-362, 2015.

TONETTI, A.L.; CERQUEIRA, R.S.; CORAUCCI FILHO, B.; von SPERLING, M.; FIGUEIREDO, R.F. Tratamento de esgotos de pequenas comunidades pelo método do escoamento superficial no solo. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v.1, n.13, p.69-79, 2009.

UFV, UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. Mapa de solos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Fundação Estadual de Meio Ambiente, 2010, 4p.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3ª edição - Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005. 452p.