

# Nutrição mineral da cana-de-açúcar irrigada com efluente de esgoto tratado, em área com aplicação de fosfogesso

Julius Blum<sup>(1)</sup>, Adolpho José Melfi<sup>(2)</sup> e Célia Regina Montes<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidade de São Paulo (USP), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq), Núcleo de Pesquisa em Geoquímica e Geofísica da Litosfera, Caixa Postal 9, Avenida Pádua Dias, nº 11, CEP 13418-900 Piracicaba, SP. E-mail: juliusblum@yahoo.com.br <sup>(2)</sup>USP, Esalq, Departamento de Ciência do Solo. E-mail: ajmelfi@usp.br <sup>(3)</sup>USP, Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Caixa Postal 96, CEP 13400-970 Piracicaba, SP. E-mail: crmlauar@usp.br

**Resumo** – O objetivo deste trabalho foi quantificar o aporte e a remoção de nutrientes em sistemas de cultivo de cana-de-açúcar irrigados, ou não, com efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE), com e sem adição de fosfogesso, bem como avaliar os efeitos desses sistemas de cultivo no estado nutricional das plantas. Foram avaliados tratamentos sem irrigação e com irrigação a 100 e 150% da necessidade hídrica da cultura. Os tratamentos com fosfogesso foram aplicados em área de terceiro corte, irrigada com EETE desde o plantio. As avaliações foram realizadas em duas safras. Os tratamentos não afetaram os rendimentos de colmos. O tratamento com EETE e fosfogesso apresentou efeito sinérgico sobre o conteúdo de nitrogênio e de enxofre nas plantas. O EETE beneficiou a nutrição das plantas quanto ao fósforo, mas não causou melhorias na nutrição com potássio e enxofre. A nutrição com ferro, zinco e manganês não foi influenciada pelo aporte desses micronutrientes pelo EETE. O fósforo e o nitrogênio aportados na irrigação com EETE devem ser considerados na recomendação de adubação. Porém, potássio, enxofre, ferro, zinco e manganês do efluente não são fontes eficientes desses nutrientes para as plantas.

**Termos para indexação:** *Saccharum*, água residuária, equilíbrio nutricional, exportação de nutrientes, nutrição mineral, sodificação.

## Mineral nutrition of sugarcane irrigated with sewage effluent in an area with phosphogypsum application

**Abstract** – The objective of this work was to quantify input and removal of nutrients of sugarcane crop systems irrigated, or not, with treated sewage effluent (TSE), with or without phosphogypsum application, as well as to evaluate the effects of these crop systems on plant mineral nutrition status. The evaluated treatments were nonirrigated, and irrigated at 100 and 150% of crop water demand. Phosphogypsum treatments were applied on a third-harvest sugarcane area, irrigated with TSE since planting. The evaluations were done during two crop seasons. Sugarcane yield was not affected by the treatments. There was a synergic effect on nitrogen and sulfur contents of plants in the treatment with TSE and phosphogypsum. TSE improved plant nutrition as to phosphorus, but it did not as to potassium and sulfur. Iron, zinc, and manganese nutrition was not affected by these micronutrient inputs by TSE. Phosphorus and nitrogen from TSE irrigation should be considered for fertilization recommendations. However, potassium, sulfur, iron, zinc and manganese present in the effluent are not efficient sources of nutrients for plants.

**Index terms:** *Saccharum*, wastewater, nutritional balance, nutrient removal, mineral nutrition, sodification.

### Introdução

O uso de efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE) para irrigação de culturas é uma prática antiga, inicialmente empregada para controlar a poluição da água e proteger a saúde pública (Paranychianakis et al., 2006). Atualmente, em países como Israel, onde a disponibilidade de água doce é limitada, mais de um terço da água de irrigação provém do aproveitamento

de águas residuárias (Central Bureau of Statistics, 2011). Embora exista abundância de água na maioria das regiões brasileiras (Tucci et al., 2001), há grande preocupação com o descarte desse tipo de efluente em corpos d'água, em razão do risco de eutrofização (Fonseca et al., 2005).

No Brasil, estudos sistemáticos sobre o uso de EETE para irrigação de culturas tiveram início em 2000. Nesses estudos, essa técnica resultou em

fornecimento parcial de N para o milho (Fonseca et al., 2005), incremento de massa de matéria seca e proteína em capim-bermuda 'Tifton 85' (Fonseca et al., 2007), aumento de produtividade e substituição da fertilização mineral em culturas olerícolas (Azevedo & Oliveira, 2005; Rego et al., 2005). Em estudos com cana-de-açúcar, Leal et al. (2009a) relataram aumento de rendimento de colmos de mais de 50%, e Deon et al. (2010) observaram incremento na produtividade, com possibilidade de redução da adubação nitrogenada. No entanto, Herpin et al. (2007) relataram níveis deficientes de N, P e S em café e Pereira et al. (2011) verificaram desequilíbrio nutricional em plantas cítricas, com acúmulo de S e deficiência de P e K, em cultivos irrigados com EETE. A adição de N em excesso, relatada por Leal et al. (2009a), apresenta risco de lixiviação. Assim, apesar dos efeitos benéficos, o aporte desequilibrado de nutrientes e de outros elementos no efluente pode causar distúrbios nutricionais e ameaças ambientais.

O acúmulo de Na no solo é outra consequência negativa da irrigação com EETE. Leal et al. (2009b) verificaram aumento de 4 para 26% no percentual de sódio trocável (PST) do solo, com consequente aumento da percentagem de argila dispersa em água, após 2.524 mm de irrigação com EETE, durante 16 meses. Além dos problemas na física dos solos causados pelo excesso de sódio, a eficiência de utilização dos nutrientes do EETE também pode ser comprometida pela sodificação do solo, o que exige a adoção de práticas adicionais para a amenização desses efeitos. Neste sentido, o gesso pode ser uma alternativa para a viabilização da irrigação com EETE, para a recuperação dos danos causados pelo excesso de sódio (Halliwell et al., 2001). Além disso, a absorção de nutrientes pelas plantas pode ser influenciada pela interação de íons no solo (Kalavrouziotis et al., 2009), o que torna importante o estudo da dinâmica de nutrientes e outros elementos do solo na presença de gesso, em áreas tratadas com EETE.

A remoção, pelas plantas, dos elementos químicos adicionados é outro fator importante para a viabilidade da irrigação com EETE (Tzanakakis et al., 2009). Assim, com a finalidade de aumentar a eficiência de fertilizantes minerais e minimizar o transporte de nutrientes para as águas subterrâneas, os constituintes nutricionais nas águas residuárias devem ser contabilizados nos programas de fertilização (Segal

et al., 2011), o que requer o conhecimento da absorção e remoção de nutrientes pelas espécies de plantas em diferentes situações.

O objetivo deste trabalho foi quantificar o aporte e a remoção de nutrientes em sistemas de cultivo de cana-de-açúcar irrigados, ou não, com efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE), com e sem adição de fosfogesso, bem como avaliar os efeitos desses sistemas de cultivo no estado nutricional das plantas.

## Material e Métodos

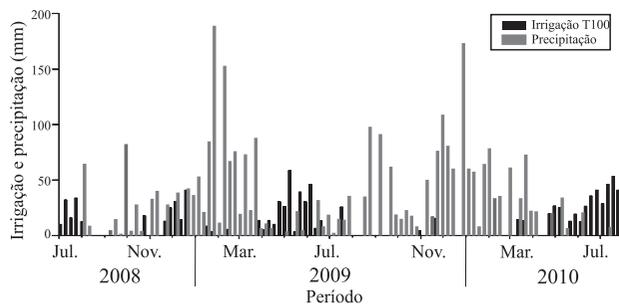
O experimento foi realizado no Município de Lins, SP, em área situada junto à estação de tratamento de esgoto por lagoas de estabilização operada pela Sabesp (21°38'5"S, 49°44'4"W e 422 m de altitude). O solo das parcelas experimentais foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, com textura franco-argilo-arenosa (Santos et al., 2006). A cana-de-açúcar, cultivar RB 72454, foi plantada em maio de 2005, a colheita ocorreu nos meses de setembro, entre 2006 e 2010 e, no presente estudo, foram avaliadas as safras de 2008/2009 e 2009/2010. Para a fertilização da cana-soca, nos anos avaliados, foi utilizada metade da dosagem de N sugerida pelas recomendações técnicas para o Estado de São Paulo (Raij & Cantarella, 1996); assim, foram aplicados 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, a cada ano, na forma de nitrato de amônio. Com base nos resultados das análises de solo quanto a K (2,1 e 2,4 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> de K em 2008 e 2009, respectivamente) foram aplicados 60 kg ha<sup>-1</sup> do nutriente por ano, na forma de cloreto de potássio. A concentração média de P-resina no solo foi de 23,1 e 9,8 mg dm<sup>-3</sup>, em 2008 e 2009, o que resultou em recomendações de 0 e 13 kg ha<sup>-1</sup> de P, respectivamente, aplicado na forma de superfosfato triplo.

A precipitação pluvial média foi de 1.450 mm, concentrada entre os meses de setembro e abril, com 66 e 89% da irrigação tendo sido realizada entre os meses de abril e julho, nos anos de 2009 e 2010 respectivamente (Figura 1). Em novembro de 2009, foram aplicados 103,5 mm de EETE via irrigação, diferentemente do que ocorreu em 2010, quando 600 mm da precipitação pluvial acumulada de agosto a novembro tornaram desnecessária a irrigação.

Amostras de EETE foram coletadas bimestralmente, na entrada da tubulação do sistema de irrigação,

e analisadas de acordo com a metodologia APHA (American Public Health Association, 1992). Os íons  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{Cl}^-$  foram determinados em sistema de análise de injeção em fluxo contínuo, e Al, Fe, K, Ca, Mg, Na, S, B, Zn, Cd, Cr, Cu, Ni e Pb por espectrometria de emissão óptica, com plasma de argônio acoplado indutivamente (ICP-OES). As concentrações ( $\text{mg L}^{-1}$ ) dos principais constituintes do EETE utilizado na irrigação foram: Cl ( $57,7 \pm 10,6$ ), P ( $3,6 \pm 2,9$ ), N-mineral ( $21,0 \pm 10,2$ ), Al ( $0,02 \pm 0,01$ ), Fe ( $0,12 \pm 0,05$ ), K ( $18,7 \pm 13,4$ ), Ca ( $7,90 \pm 1,32$ ), Mg ( $1,96 \pm 0,58$ ), Na ( $112,3 \pm 43,14$ ), S ( $51,2 \pm 30,0$ ), B ( $0,1 \pm 0,02$ ), Mn ( $0,02 \pm 0,01$ ) e Zn ( $0,02 \pm 0,01$ ). Não foram detectados os elementos Cd, Cr, Cu, Ni e Pb. A quantidade de nutrientes aplicados via irrigação foi calculada pela integração do produto da concentração de nutrientes no efluente e o volume de EETE aplicado no período irrigado.

Cinco tratamentos foram realizados de maio de 2005 a outubro de 2008: sem irrigação (T0), e irrigação com 100% (T100), 125% (T125), 150% (T150) e 200% (T200) da necessidade hídrica da cultura (NHC). O manejo da irrigação foi realizado com base na umidade crítica do solo, na camada 0–0,6 m, monitorada por meio de tensiômetros. O sistema de irrigação foi acionado sempre que o potencial matricial do solo era inferior a -40 kPa, pelo tempo necessário para elevar o potencial da água no solo para -10 kPa, no tratamento T100, ou a valores 25, 50 e 100% superiores nos tratamentos T125, T150 e T200, respectivamente. O delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso, com quatro repetições. As parcelas foram constituídas por cinco linhas de 40 m de comprimento, espaçadas em 1,4 m entre si; a área total da parcela era de 280  $\text{m}^2$ , em que a área útil para avaliações era de 126  $\text{m}^2$ .



**Figura 1.** Precipitação pluvial e irrigação durante o período de avaliação do experimento.

Em novembro de 2008, os tratamentos T125 e T200 passaram a receber 100 e 150% da NHC, respectivamente. Assim, passaram a existir oito parcelas que recebiam 100% da NHC e oito parcelas que recebiam 150% da NHC. Quatro destas oito parcelas, em cada lâmina de irrigação, receberam aplicação superficial de fosfogesso, com doses calculadas para substituir todo o sódio trocável da camada de 0–0,60 m. Assim, os tratamentos avaliados no presente estudo consistiram de: T0, T100, T100 + fosfogesso (T100G), T150 e T150G.

A amostragem de folhas para avaliação nutricional foi realizada no mês de janeiro, em 2009 e 2010. Foram tomados o terço central da primeira folha totalmente expandida, sem a nervura central, de cada planta, no total de 20 plantas por parcela. Antes da colheita, 15 plantas inteiras de cana-de-açúcar foram tomadas e divididas em ponteiros, compostos por folhas verdes, bainha foliar e cana imatura, e colmos. As partes foram pesadas, moídas separadamente e amostradas. O caldo de cana foi extraído das amostras de colmo, e o suco e o bagaço foram amostrados. As amostras de caldo foram congeladas, e todas as demais amostras dos tecidos vegetais foram secas em estufa a 60°C, pelo tempo necessário à estabilização da massa, e moídas em moinho tipo Wiley equipado com peneira de 0,85 mm.

Análises de nutrientes e do teor de sódio foram realizadas nas folhas, bagaço, ponteiros e caldo. O nitrogênio foi determinado pelo método semimicro-Kjeldahl, no extrato da digestão sulfúrica. Fósforo, K, Ca, Mg, S, Na, Zn, Fe, Mn e Cu foram determinados por ICP-OES, em extratos obtidos por digestão em ácido nítrico perclórico (Malavolta et al., 1997). Em 2010, além dos elementos mencionados, também foram determinados, Cd, Cr, Ni e Pb. A concentração de boro foi determinada por ICP-OES, após a digestão seca do material vegetal e a dissolução em solução de ácido clorídrico. A remoção de nutrientes pelos colmos foi calculada pela soma do total de nutrientes encontrados no caldo e no bagaço. O acúmulo de nutrientes na parte aérea foi calculado pela soma do total de nutrientes no colmo e nos ponteiros. O rendimento de colmos por hectare foi medido pela pesagem de todos os caules da área útil.

As amostras de solo foram coletadas da camada de 0–0,2 m, em setembro de 2010, para determinação de: pH, em  $\text{CaCl}_2$ ; H+Al; Al, Ca e Mg, em KCl; Na, K e P, em solução Mehlich-1; S, em fósforo monocalcico

0,01 mol L<sup>-1</sup>; B, em solução 0,006 mol L<sup>-1</sup> de BaCl<sub>2</sub>, aquecido em forno de micro-ondas; e Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, em solução DTPA-TEA.

A análise de variância e o teste de Tukey foram realizados quanto ao rendimento de bagaço, caldo, ponteiros e colmos da cana-de-açúcar, e à concentração e acúmulo de nutrientes e outros elementos, nos tecidos de cana, de forma independente para cada ano, pelo programa R (R Development Core Team, 2008).

## Resultados e Discussão

A irrigação com EETE não afetou o rendimento de ponteiros, caldo, bagaço ou colmos em 2010 (Tabela 1). Em 2009, houve diferença nestes componentes, apenas com a adoção de probabilidade de 10%, com incremento de produtividade nos tratamentos com 150% da NHC. Apesar da oferta de nutrientes e água pela irrigação com EETE, os efeitos sobre a produção agrícola foram apenas leves, o que esteve provavelmente relacionado ao manejo convencional do solo e ao tráfego de caminhões carregados em solo com elevada umidade, durante a colheita, o que poderia ter causado compactação do solo e, conseqüentemente, falhas de brotação. Dessa forma, a compactação do solo teria limitado o potencial produtivo da cultura e restringido o efeito dos tratamentos sobre o rendimento de colmos, conforme apontado por Blum et al. (2009). Em 2009, o rendimento de colmos chegou a 100 Mg ha<sup>-1</sup> em algumas parcelas irrigadas. Em 2010, os rendimentos variaram entre 60,5 e 62,5 Mg ha<sup>-1</sup> nas parcelas T0 e T150 respectivamente.

O nitrogênio adicionado por irrigação com EETE não foi suficiente para suprir o acúmulo total de N pela parte aérea em 2009, já que, nesse ano, o total

de N acumulado pela parte aérea das plantas de cana foi de cerca de 180 kg ha<sup>-1</sup>, para T100, e o aporte pelo EETE foi de 100 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 2). Apesar de não ter sido suficiente para suprir a absorção total do nutriente pelas plantas, o aporte de N pelo efluente foi de 1,4 a 4,0 vezes superior ao total de N exportado pela cultura. Em T0, a concentração de N nas folhas foi inferior à da faixa ideal descrita por van Raij & Cantarella, (1996). Essa deficiência ocorreu em consequência da fertilização abaixo da recomendada, realizada para verificar a capacidade do fornecimento de N por meio da irrigação com EETE, o que foi parcialmente confirmado, pois, quase todos os tratamentos irrigados apresentaram concentrações muito próximas ou dentro da faixa considerada ideal. Em 2010, os efeitos da irrigação sobre o acúmulo N pelas plantas foram mais pronunciados na presença do fosfogesso, principalmente em T150G. O papel do gesso na nutrição e no acúmulo de N está provavelmente relacionado ao fornecimento de S, pois estudos com cana-de-açúcar (Bologna-Campbell, 2007) e outras gramíneas (De Bona & Monteiro, 2010) mostraram o aumento da absorção de N pelas plantas em razão da fertilização com enxofre.

A concentração de S nas folhas foi afetada pela irrigação e tratamentos com gesso (Tabela 2). Em 2009, não houve diferença na concentração de S nas folhas entre tratamentos irrigados sem aplicação de gesso e o T0, mas, nos tratamentos com adição de gesso, a concentração de S foi maior do que nos outros. No efluente utilizado, a relação N:S foi de 10:4, muito menor do que a proporção ideal de 10:1, relatada por De Bona & Monteiro (2010). As entradas totais de S no sistema, via irrigação, foram pelo menos três vezes maiores do que o total acumulado na planta. No entanto, em 2009, as concentrações de S nas folhas

**Tabela 1.** Rendimento (Mg ha<sup>-1</sup>) de bagaço, caldo, ponteiros e colmos de cana-de-açúcar, em 2009 e 2010.

Tratamento <sup>(1)</sup>	Caldo		Bagaço		Ponteiros		Colmos	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
T0	63,31	50,83	12,18	9,68	16,19	5,86	87,24	60,51
T100	62,05	50,73	11,58	9,13	14,79	5,94	84,51	59,86
T100G	62,84	50,72	11,65	9,51	16,57	5,80	86,08	58,13
T150	70,06	48,66	13,38	9,47	18,01	5,77	95,82	60,23
T150G	68,63	52,55	12,72	9,99	13,62	6,07	93,43	62,53
p	0,08	0,87	0,17	0,88	0,12	0,99	0,11	0,89
DMS	10,01	11,24	2,46	2,59	4,99	2,21	14,29	13,43

<sup>(1)</sup>T0, sem irrigação; T100, irrigado com efluente de estação de tratamento de esgoto com 100% da necessidade hídrica da cultura (NHC); T100G, irrigado com 100% da NHC e adição de fosfogesso; T150, irrigado com 150 % da NHC; e T150G, irrigado com 150% da NHC e adição de fosfogesso. p, probabilidade de significância do teste F; DMS, diferença mínima significativa, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade

foram inferiores às da faixa ideal, nos tratamentos sem gesso, o que indica ineficiência da irrigação com EETE no fornecimento do nutriente.

A ausência de efeito da irrigação sobre os teores disponíveis de S no solo (Tabela 3) está de acordo com a ausência de de EETE sobre a concentração de S nas folhas. Em 2010, a concentração de S nas folhas aumentou com a irrigação, principalmente nos tratamentos com fosfogesso, e resultou também em aumentos no acúmulo e exportação de S. No entanto, nessa safra, a concentração de S nas folhas, mesmo no T0, manteve-se dentro da faixa ideal. Esse resultado

pode ser atribuído à baixa produtividade alcançada nesse ano, que causou a diminuição da exigência de S e permitiu que o solo fosse capaz de fornecer todo o S necessário para o desenvolvimento das plantas (Tabela 2).

Não houve deficiência de P nas folhas, durante o período avaliado. A irrigação com EETE não afetou a nutrição fosfatada em 2009 e aumentou a concentração de P nas folhas em 2010. Em razão da presença de P no EETE, o aumento da concentração deste elemento no solo, com reflexo sobre a nutrição das plantas (Segal et al., 2011), é frequentemente relatado em estudos

**Tabela 2.** Conteúdo de N, S, P e K em folhas, ponteiros, bagaço e caldo de plantas de cana-de-açúcar, e total removido e acumulado pela cultura, em 2009 e 2010.

Tratamento <sup>(1)</sup>	Folha		Ponteiro		Bagaço		Caldo		Removido		Acumulado	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
----- (g kg <sup>-1</sup> ) -----												
N (Faixa de suficiência <sup>(2)</sup> de 18–25 g kg <sup>-1</sup> . Aporte de 103 kg ha <sup>-1</sup> )												
T0	17,24	17,56	6,30	3,21	2,71	2,23	0,48	0,50	63,10	47,60	164,90	66,20
T100	17,86	17,77	7,04	3,79	3,09	2,59	0,61	0,68	73,30	57,90	177,50	80,40
T100G	18,09	17,69	6,88	4,24	2,90	2,48	0,54	0,76	68,30	61,70	182,00	86,40
T150	18,68	17,33	7,07	3,92	3,01	2,54	0,56	0,65	80,00	55,50	209,00	78,20
T150G	18,94	18,49	8,10	4,37	3,33	2,71	0,58	0,77	81,80	67,20	192,40	93,70
p	0,02	0,02	0,06	0,12	0,03	0,17	0,10	0,03	0,10	0,09	0,34	0,01
DMS	1,44	0,92	1,66	1,34	0,54	0,57	0,14	0,24	22,20	20,20	66,70	20,80
S (Faixa de suficiência de 1,5–3,0 g kg <sup>-1</sup> . Aporte de 176 kg ha <sup>-1</sup> )												
T0	1,39	1,89	1,00	0,97	0,27	0,40	0,18	0,16	14,60	11,80	30,80	17,50
T100	1,43	2,09	1,50	1,22	0,32	0,48	0,26	0,21	19,60	14,80	41,90	22,00
T100G	1,87	2,19	2,02	1,00	0,48	0,60	0,20	0,25	18,10	18,30	52,10	23,70
T150	1,48	2,16	1,34	1,09	0,28	0,50	0,20	0,19	17,40	14,00	41,50	20,40
T150G	2,23	2,48	2,32	1,46	0,49	0,70	0,14	0,31	15,50	23,20	48,20	32,00
p	0,00	0,00	0,00	0,17	0,01	0,00	0,54	0,00	0,82	0,00	0,18	0,00
DMS	0,42	0,16	0,83	0,64	0,20	0,15	0,22	0,08	14,60	4,30	26,50	7,00
P (Faixa de suficiência de 1,5–3,0 g kg <sup>-1</sup> . Aporte de 15 kg ha <sup>-1</sup> )												
T0	2,17	2,06	0,98	0,45	0,28	0,27	15,08	18,17	10,00	7,90	25,70	10,50
T100	2,32	2,19	1,18	0,47	0,33	0,34	13,94	16,67	11,10	10,10	28,40	12,90
T100G	2,16	2,21	1,00	0,50	0,33	0,31	14,46	17,37	10,30	9,00	26,70	11,90
T150	2,26	2,21	1,15	0,49	0,34	0,37	14,24	17,32	12,40	11,30	33,20	14,10
T150G	2,43	2,26	1,28	0,55	0,36	0,34	13,61	16,50	11,70	11,30	29,50	14,70
p	0,61	0,01	0,07	0,47	0,21	0,12	0,10	0,02	0,37	0,23	0,26	0,15
DMS	0,61	0,15	0,33	0,17	0,10	0,11	1,58	1,47	4,20	5,20	10,60	5,30
K (Faixa de suficiência de 10–16 g kg <sup>-1</sup> . Aporte de 109 kg ha <sup>-1</sup> )												
T0	12,18	8,25	11,54	7,29	3,38	2,03	1,03	1,28	105,90	84,00	291,60	127,00
T100	12,75	8,72	16,13	6,48	3,32	2,11	1,15	1,47	109,40	94,50	348,60	133,40
T100G	13,07	8,34	14,03	5,84	3,57	2,12	1,05	1,33	108,30	87,80	339,30	121,00
T150	10,97	8,29	13,59	5,88	3,38	2,22	1,09	1,30	122,20	84,10	366,90	118,00
T150G	13,77	8,16	16,99	6,40	3,38	2,35	1,29	1,36	130,70	94,20	364,90	132,90
p	0,15	0,58	0,00	0,58	0,98	0,77	0,30	0,76	0,13	0,42	0,34	0,34
DMS	3,34	1,14	3,48	3,06	1,43	0,83	0,40	0,50	32,60	23,00	123,70	27,70

<sup>(1)</sup>T0, sem irrigação; T100, irrigado com efluente de estação de tratamento de esgoto com 100% da necessidade hídrica da cultura (NHC); T100G, irrigado com 100% da NHC e adição de fosfogesso; T150, irrigado com 150% da NHC; e T150G, irrigado com 150% da NHC e adição de fosfogesso. <sup>(2)</sup>Raij & Cantarella (1996). p, probabilidade de significância do teste F; DMS, diferença mínima significativa, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

relacionados à irrigação com o efluente. Na safra de 2009, a concentração de P no solo foi considerada alta em todas as parcelas (média de 22 mg kg<sup>-1</sup>, na camada de 0–0,2 m); assim, a ausência de efeito da irrigação com EETE provavelmente ocorreu em consequência do fornecimento adequado de P pelo solo. Em 2010, os níveis de P disponível no solo diminuíram, e a concentração de P, classificada como baixa (Tabela 3), fez com que o P fornecido pela irrigação se tornasse mais importante para a nutrição das plantas. A quantidade total de P, removida pelos colmos ou absorvida pela parte aérea, não se alterou com os tratamentos, apesar do aumento do acúmulo de P nos ponteiros, em 2009, e diminuição do acúmulo de P no caldo, em 2010, no tratamento T150G. O aporte total de P, via irrigação, foi de 16 kg ha<sup>-1</sup> por ano, e o acúmulo total pela parte aérea da planta foi de 29 e 13 kg ha<sup>-1</sup>, nos anos de 2009 e 2010, respectivamente. Assim, a eficácia do fornecimento de P, pela irrigação com EETE, foi confirmada pelo aumento da concentração de P nas folhas. Os riscos ambientais, em razão do excesso da aplicação de P, foram descartados, já que o acúmulo deste nutriente pelas plantas foi semelhante à quantidade aportada.

O fornecimento de K, por meio da irrigação com EETE, foi suficiente para repor todo o K removido pelos colmos, nos dois anos, mas não para suprir o acúmulo pela parte aérea das plantas (Tabela 2). No entanto, o K total acumulado pela parte aérea não é tão importante para o manejo da adubação, pois esse elemento é facilmente liberado da biomassa (Calonego et al., 2005). A melhoria da disponibilidade de K, em resposta à irrigação com EETE, era esperada, pois este nutriente é encontrado na composição de EETE, principalmente na forma inorgânica K<sup>+</sup> (Pereira et al., 2011) prontamente disponível às plantas. No entanto, a nutrição de K não foi beneficiada pela irrigação, tendo mesmo sido encontrados níveis deficientes de K nas folhas, em 2010. Essa ausência de efeito pode

ser atribuída à rápida lixiviação do elemento no solo, pois não foram observadas alterações no teor de K na camada superficial do solo, após cinco anos do início da irrigação (Tabela 3). Outro fato que pode ter inibido o efeito do efluente sobre a nutrição potássica é que tanto a alta concentração de Na (Naidu & Rengasamy, 1993) e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Pereira et al., 2011), quanto a de Ca (Kahn & Hanson, 1957), no solo, podem limitar a absorção de K pelas plantas.

As concentrações de N, P e K nos ponteiros foram muito maiores em 2009 do que em 2010, o que resultou em maior acúmulo no primeiro ano (Tabela 2). Já as concentrações de Ca e S nos ponteiros foram semelhantes, em ambos os anos (Tabelas 2 e 4). Nitrogênio, P e K são considerados móveis no floema, enquanto Ca e S são considerados imóveis (Taiz & Zeiger, 2004). Portanto, indicando a ocorrência de remobilização de N, P e K, em 2010, apesar de a colheita ter sido realizada no mesmo período do ano e em condições muito semelhantes de clima e de irrigação às observadas em 2009. No entanto, Zn, Cu, Fe e Mn, considerados imóveis, também tiveram menor concentração nos ponteiros em 2010 (Tabela 5).

A aplicação de gesso promoveu aumento da concentração de Ca nas folhas, quando associado à irrigação na dose de 150% da NHC (Tabela 4). Houve, também, aumento da concentração de Ca no bagaço e ponteiros, em 2009, e no caldo, em 2010, no tratamento T150G, o que resultou em aumento de remoção de Ca pelos colmos. Em 2009, a irrigação com EETE aumentou a concentração de Mg na parte aérea e no caldo, o que resultou em aumento do acúmulo e remoção de Mg, principalmente em T150 e T150G. O EETE é fonte de Ca e Mg, e o aporte médio desses nutrientes, de 34 e 10 kg ha<sup>-1</sup> por ano, respectivamente, pode suprir total ou parcialmente a necessidade das plantas quanto a esses nutrientes – a depender da variação na demanda –, podendo inclusive incrementar a disponibilidade

**Tabela 3.** Atributos químicos do solo, na camada de 0–0,2 m, em setembro de 2010.

Tratamento <sup>(1)</sup>	pH	Al	Ca	Mg	K	Na	V	P	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
	CaCl <sub>2</sub>	----- (mmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) -----					(%)	----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----						
T0	4,50	1,50	8,8	3,22	1,17	0,33	33,1	14,8	6,65	0,75	62,9	1,79	5,67	0,26
T100	4,98	0,60	12,9	6,15	1,21	1,42	49,7	14,3	6,66	0,52	52,0	1,37	6,76	0,27
T100G	4,77	0,64	12,9	4,22	1,19	1,05	48,9	11,3	9,90	0,38	42,1	0,71	5,67	0,23
T150	5,10	0,25	12,0	5,18	1,16	2,44	52,3	11,5	7,51	0,49	40,6	1,03	5,46	0,31
T150G	5,08	0,36	14,3	5,34	1,09	1,95	52,5	11,8	9,75	0,52	37,0	1,24	6,16	0,31

<sup>(1)</sup>T0, sem irrigação; T100, irrigado com efluente de estação de tratamento de esgoto com 100% da necessidade hídrica da cultura (NHC); T100G, irrigado com 100% da NHC e adição de fosfogesso; T150, irrigado com 150 % da NHC; e T150G, irrigado com 150% da NHC e adição de fosfogesso. V, saturação por bases.

desses elementos no solo no longo prazo (Rana et al., 2010). Além disso, o efeito da irrigação sobre Ca e Mg, na nutrição e acúmulo pelas plantas, também pode estar relacionado a fatores como melhor abastecimento de água e correção da acidez do solo. As concentrações de Ca e Mg nas folhas, durante os dois anos, ficaram dentro da faixa ótima para o desenvolvimento de plantas (Rajj & Cantarella, 1996).

O acúmulo de sódio nas folhas é frequentemente relatado como consequência da irrigação com EETE (Fonseca et al., 2005; Tzanakakis et al., 2009). Contudo, no presente trabalho, o aumento de Na nos tecidos não foi verificado nem com a aplicação de lâmina excessiva de irrigação (Tabela 4). Assim, a razão Ca:Mg:K:Na de 4,0:1,8:0,3:1,0, mesmo com a elevada concentração (3 mmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>) e saturação de Na (PST de 8%, solo sódico) encontrados na camada de 0–0,6 m, no ano de 2010, não causou desequilíbrio nutricional nas plantas. A remoção média de Na pela

cana foi de 106 kg ha<sup>-1</sup>, o que resultou em desequilíbrio entre entrada (701 kg ha<sup>-1</sup>) e remoção deste elemento, com riscos grandes à qualidade física do solo.

As concentrações de Cu, Fe e Zn nos tecidos não foram afetadas pela irrigação ou aplicação de gesso (Tabela 5). A irrigação com EETE forneceu até 90 e 170% do Zn e Fe removidos pelos colmos, respectivamente. No entanto, a disponibilidade e a utilização de Zn e Fe para as plantas foram drasticamente diminuídas pelo aumento no pH do solo; e o pH foi maior nas parcelas irrigadas com EETE (Tabela 3). Dessa forma, a adição desses nutrientes pela irrigação com EETE não teve como influenciar seu acúmulo nas plantas. A irrigação com efluente foi capaz de fornecer entre 10 e 30% do Mn removido pelos colmos (Tabela 5). Porém, em geral, houve redução na concentração de Mn nos tecidos foliares e nos colmos, nas parcelas irrigadas, provavelmente relacionado ao

**Tabela 4.** Conteúdo de Ca, Mg e Na em folhas, ponteiros, bagaço e caldo de plantas de cana-de-açúcar, e total removido e acumulado pela cultura, em 2009 e 2010.

Tratamento <sup>(1)</sup>	Folha		Ponteiro		Bagaço		Caldo		Removido		Acumulado	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
----- (g kg <sup>-1</sup> ) -----												
Ca (Faixa de suficiência <sup>(2)</sup> de 2,0–8,0 g kg <sup>-1</sup> . Aporte de 32 kg ha <sup>-1</sup> )												
T0	3,11	2,93	2,03	2,95	0,28	0,30	0,07	0,08	7,80	7,00	40,60	24,20
T100	3,06	3,17	2,81	2,75	0,31	0,29	0,10	0,11	9,90	8,00	51,80	23,80
T100G	3,16	3,55	2,63	2,65	0,35	0,32	0,09	0,10	9,70	8,40	52,90	23,40
T150	3,03	3,16	2,45	2,55	0,28	0,31	0,10	0,11	10,70	7,90	55,30	23,30
T150G	4,01	3,69	3,03	2,55	0,33	0,28	0,11	0,13	11,50	9,60	53,70	25,10
p	0,02	0,01	0,01	0,92	0,04	0,81	0,10	0,02	0,1	0,0	0,30	1,00
DMS	0,85	0,59	0,77	1,61	0,08	0,11	0,04	0,04	3,90	1,70	23,40	11,30
----- (kg ha <sup>-1</sup> ) -----												
Mg (Faixa de suficiência de 1,0–3,0 g kg <sup>-1</sup> . Aporte de 9 kg ha <sup>-1</sup> )												
T0	1,58	1,58	1,23	1,54	0,35	0,41	0,35	0,16	26,70	12,10	46,40	21,10
T100	1,68	1,71	1,58	1,49	0,33	0,42	0,41	0,17	29,60	12,60	52,70	21,10
T100G	1,63	1,63	1,60	1,35	0,35	0,45	0,47	0,19	33,50	14,10	60,00	21,90
T150	1,85	1,73	1,68	1,23	0,38	0,41	0,48	0,19	38,20	13,00	68,50	20,30
T150G	2,05	1,65	1,75	1,33	0,33	0,37	0,48	0,20	36,60	14,50	60,90	22,50
p	0,13	0,37	0,07	0,50	0,73	0,45	0,05	0,01	0,01	0,10	0,04	0,58
DMS	0,60	0,25	0,54	0,60	0,13	0,13	0,13	0,04	9,20	2,90	20,00	4,50
Na (Aporte de 701 kg ha <sup>-1</sup> )												
T0	2,17	1,74	1,98	2,80	1,45	1,69	1,43	1,06	108,20	70,60	136,70	87,00
T100	2,11	1,63	2,62	2,40	2,01	1,81	1,28	1,46	102,70	88,80	140,30	102,70
T100G	2,11	1,61	2,11	2,42	1,77	1,63	1,28	1,73	102,10	104,10	141,30	118,30
T150	1,92	1,70	2,24	1,96	2,26	1,74	1,13	2,04	110,00	125,20	149,70	140,20
T150G	2,30	1,69	2,81	2,44	2,51	1,84	1,29	2,29	119,90	130,00	158,80	141,10
p	0,28	0,97	0,05	0,65	0,41	0,57	0,59	0,18	0,69	0,20	0,68	0,29
DMS	0,52	0,65	0,86	1,67	1,79	0,44	0,56	1,39	42,70	79,30	52,50	76,50

<sup>(1)</sup>T0, sem irrigação; T100, irrigado com efluente de estação de tratamento de esgoto com 100% da necessidade hídrica da cultura (NHC); T100G, irrigado com 100% da NHC e adição de fosfogesso; T150, irrigado com 150% da NHC; e T150G, irrigado com 150% da NHC e adição de fosfogesso. <sup>(2)</sup>Rajj & Cantarella (1996). p, probabilidade de significância do teste F; DMS, diferença mínima significativa, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

aumento do pH (Sims, 1986) e ao déficit no balanço do nutriente no solo.

A quantidade de B fornecida pela irrigação com EETE foi, em média, cinco vezes a quantidade absorvida (Tabela 5); no entanto, o acúmulo do nutriente pelas plantas não foi afetado pela irrigação com EETE. Apesar do elevado aporte do nutriente pelo efluente e do aumento de pH, que também contribui para a disponibilidade de B, os níveis de B nas folhas foram, em geral, inferiores à faixa de concentração ideal.

As concentrações de Cd, Cr, Cu, Pb e Ni ficaram abaixo do limite detectável no EETE (menor do que 0,01 mg L<sup>-1</sup>) e

em todos os tecidos da planta (menor do que 0,5 mg kg<sup>-1</sup>). O cromo não foi detectado em folhas, brotos ou caldo, e a irrigação com EETE reduziu sua concentração no bagaço (p<0,05), de 1,0 mg kg<sup>-1</sup>, no tratamento T0, para 0,77 mg kg<sup>-1</sup> nos tratamentos irrigados. Esse efeito provavelmente está relacionado ao aumento no pH, pois nesse caso o Cr é transformado a formas menos disponíveis (Wittbrodt & Palmer, 1997). Aumentos no acúmulo de elementos-traço como resultado da irrigação com EETE são frequentemente relatados (Singh et al., 2009), mas sempre relacionados à presença do elemento no EETE ou à diminuição do pH do solo.

**Tabela 5.** Conteúdo de Zn, Cu, Fe, Mn e B em folhas, ponteiros, bagaço e caldo de plantas de cana-de-açúcar, e total removido e acumulado pela cultura, em 2009 e 2010.

Tratamento <sup>(1)</sup>	Folha		Ponteiro		Bagaço		Caldo		Removido		Acumulado	
	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010	2009	2010
----- (mg kg <sup>-1</sup> ) -----												
Zn (Faixa de suficiência <sup>(2)</sup> de 10–15 mg kg <sup>-1</sup> . Aporte de 70 g ha <sup>-1</sup> )												
T0	17,08	10,35	22,15	12,77	10,78	6,81	1,78	1,49	243	140	596	214
T100	15,73	9,86	23,63	12,35	8,80	7,02	1,55	1,41	197	137	546	212
T100G	16,55	9,78	18,40	10,41	7,58	6,75	1,57	1,35	187	131	490	191
T150	17,18	10,19	20,48	11,20	9,78	8,63	1,66	2,03	248	180	621	245
T150G	17,00	9,78	23,80	12,15	10,10	6,99	1,58	1,93	236	171	567	244
p	0,84	0,75	0,19	0,64	0,26	0,87	0,90	0,20	0,16	0,31	0,54	0,57
DMS	4,55	1,71	7,58	5,36	4,55	6,39	0,86	1,07	91	86	252	119
----- (g ha <sup>-1</sup> ) -----												
Fe (Faixa de suficiência de 40–250 mg kg <sup>-1</sup> . Aporte de 640 g ha <sup>-1</sup> )												
T0	54,85	56,80	187,83	129,97	79,38	33,16	6,08	4,30	1.328	535	4.361	1.297
T100	56,75	53,17	206,55	113,19	78,93	32,92	6,21	4,12	1.301	514	4.359	1.179
T100G	58,15	55,68	227,60	111,55	62,13	32,80	6,08	3,88	1.079	509	4.788	1.154
T150	53,98	51,65	200,33	115,36	70,38	32,27	6,08	5,27	1.385	572	5.076	1.256
T150G	72,73	52,93	216,73	127,61	52,43	39,28	4,99	4,02	1.009	605	4.026	1.380
p	0,21	0,29	0,51	0,48	0,47	0,68	0,71	0,53	0,40	0,73	0,50	0,47
DMS	26,28	8,08	73,83	40,36	53,44	17,17	3,09	2,75	714	256	1.961	422
Mn (Faixa de suficiência de 25–250 mg kg <sup>-1</sup> . Aporte de 70 g ha <sup>-1</sup> )												
T0	58,25	57,21	96,03	43,39	17,25	11,53	9,29	5,75	800	406	2.358	660
T100	49,68	53,34	81,38	45,54	10,88	14,14	5,21	4,93	444	380	1.686	653
T100G	60,15	56,04	94,08	44,72	13,25	12,61	7,55	4,86	643	367	2.273	626
T150	39,00	52,03	59,65	46,68	8,48	14,25	3,69	4,48	379	354	1.446	621
T150G	59,93	53,83	83,80	44,21	10,38	12,53	4,51	5,49	435	410	1.553	679
p	0,12	0,02	0,24	0,47	0,03	0,50	0,22	0,15	0,2	0,6	0,2	0,9
DMS	27,37	4,61	52,08	5,86	7,69	5,57	8,04	1,61	602	124	1.448	190
B (Faixa de suficiência de 10–30 mg kg <sup>-1</sup> . Aporte de 510 g ha <sup>-1</sup> )												
T0	9,54	6,57	4,93	5,74	1,79	2,71	0,04	0,02	24,4	27,4	104,0	60,8
T100	10,41	7,27	4,98	6,67	2,11	2,92	0,04	0,02	27,1	27,5	99,7	67,1
T100G	8,18	6,77	4,61	6,04	2,33	2,76	0,04	0,02	29,8	27,1	105,9	62,4
T150	8,13	6,89	3,52	6,86	1,52	2,73	0,03	0,02	22,7	27,3	86,0	66,6
T150G	13,39	6,91	5,31	6,40	1,18	2,79	0,04	0,02	17,7	28,9	91,5	67,8
p	0,01	0,30	0,62	0,24	0,46	0,76	0,64	0,64	0,67	0,98	0,92	0,77
DMS	4,18	0,98	3,76	1,63	2,10	0,57	0,02	0,01	26,8	10,7	79,9	20,9

<sup>(1)</sup>T0, sem irrigação; T100, irrigado com efluente de estação de tratamento de esgoto com 100% da necessidade hídrica da cultura (NHC); T100G, irrigado com 100% da NHC e adição de fosfogesso; T150, irrigado com 150% da NHC; e T150G, irrigado com 150% da NHC e adição de fosfogesso. <sup>(2)</sup>Raij & Cantarella (1996). p, probabilidade de significância do teste F; DMS, diferença mínima significativa, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

## Conclusões

1. O fornecimento de enxofre pelo fosfógeno favorece a acumulação de nitrogênio, nos tratamentos com aporte de N via irrigação com efluente de estação de tratamento de esgoto (EETE).

2. O fósforo e o nitrogênio aportados na irrigação com EETE devem ser considerados na recomendação de adubação.

3. O EETE pode não ser uma fonte eficiente de alguns nutrientes, mesmo que a irrigação com o efluente proporcione elevado aporte dos mesmos ao solo, em consequência dos efeitos desse tratamento sobre atributos químicos e físicos do solo.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, por apoio financeiro e bolsa concedida; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, por bolsa concedida; ao Grupo Equipav Açúcar e Alcool e à Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, pela participação e colaboração na pesquisa.

## Referências

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 18<sup>th</sup> ed. Washington: APHA, 1992. 70p.
- AZEVEDO, L.P. de; OLIVEIRA, E.L. de. Efeitos da aplicação de efluente de tratamento de esgoto na fertilidade do solo e produtividade de pepino sob irrigação subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v.25, p.253-263, 2005.
- BLUM, J.; LEAL, R.M.P.; MONTES, C.R.; MELFI, A.J. Influência do manejo na sustentabilidade do uso agrícola de efluentes: estudo de caso com cana-de-açúcar em Lins-SP. **Revista DAE**, n.180, p.61-66, 2009.
- BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 2007. 112p. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S.; ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio da palha de plantas de cobertura em diferentes estádios de senescência após dessecação química. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.99-108, 2005.
- CENTRAL BUREAU OF STATISTICS. **Water production and consumption**. 2011. (Statistical abstract of Israel, 62). Available at: <[http://www.cbs.gov.il/reader/shnaton/templ\\_shnaton\\_e.html?num\\_tab=st21\\_05&CYear=2011](http://www.cbs.gov.il/reader/shnaton/templ_shnaton_e.html?num_tab=st21_05&CYear=2011)>. Accessed on: 20 Nov. 2011.
- DE BONA, F.D.; MONTEIRO, F.A. Nitrogen and sulfur fertilization and dynamics in a Brazilian Entisol under pasture. **Soil Science Society of America Journal**, v.74, p.1248-1258, 2010.
- DEON, M.D.I.; GOMES, T.M.; MELFI, A.J.; MONTES, C.R.; SILVA, E. da. Produtividade e qualidade da cana-de-açúcar irrigada com efluente de estação de tratamento de esgoto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, p.1149-1156, 2010.
- FONSECA, A.F. da; MELFI, A.J.; MONTEIRO, F.A.; MONTES, C.R.; ALMEIDA, V.V.; HERPIN, U. Treated sewage effluent as a source of water and nitrogen for Tifton 85 bermudagrass. **Agricultural Water Management**, v.87, p.328-336, 2007.
- FONSECA, A.F. da; MELFI, A.J.; MONTES, C.R. Maize growth and changes in soil fertility after irrigation with treated sewage effluent. I. Plant dry matter yield and soil nitrogen and phosphorus availability. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.36, p.1965-1981, 2005.
- HALLIWELL, D.J.; BARLOW, K.; NASH, D.M. A review of the effects of wastewater sodium on soil physical properties and their implications for irrigation systems. **Australian Journal of Soil Research**, v.39, p.1259-1267, 2001.
- HERPIN, U.; GLOAGUEN, T.V.; FONSECA, A.F. da; MONTES, C.R.; MENDONÇA, F.C.; PIVELI, R.P.; BREULMANN, G.; FORTI, M.C.; MELFI, A.J. Chemical effects on the soil-plant system in a secondary treated wastewater irrigated coffee plantation – a pilot field study in Brazil. **Agricultural Water Management**, v.89, p.105-115, 2007.
- KAHN, J.S.; HANSON, J.B. The effect of calcium on potassium accumulation in corn and soybean roots. **Plant Physiology**, v.32, p.312-316, 1957.
- KALAVROUZIOS, I.K.; KOUKOULAKIS, P.H.; SAKELLARIOU-MAKRANTONAKI, M.; PAPANIKOLAOU, C. Effects of treated municipal wastewater on the essential nutrients interactions in the plant of *Brassica oleracea* var. Italica. **Desalination**, v.242, p.297-312, 2009.
- LEAL, R.M.P.; FIRME, L.P.; MONTES, C.R.; MELFI, A.J.; PIEDADE, S.M.S. Soil exchangeable cations, sugarcane production and nutrient uptake after wastewater irrigation. **Scientia Agrícola**, v.66, p.242-249, 2009a.
- LEAL, R.M.P.; HERPIN, U.; FONSECA, A.F. da; FIRME, L.P.; MONTES, C.R.; MELFI, A.J. Sodicity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. **Agricultural Water Management**, v.96, p.307-316, 2009b.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo, 1997. 319p.
- NAIDU, R.; RENGASAMY, P. Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils. **Australian Journal of Soil Research**, v.31, p.801-819, 1993.
- PARANYCHIANAKIS, N.V.; ANGELAKIS, A.N.; LEVERENZ, H.; TCHOBANOGLIOUS, G. Treatment of wastewater with slow rate systems: a review of treatment processes and plant functions. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v.36, p.187-259, 2006.

- PEREIRA, B.F.F.; HE, Z.L.; SILVA, M.S.; HERPIN, U.; NOGUEIRA, S.F.; MONTES, C.R.; MELFI, A.J. Reclaimed wastewater: impact on soil-plant system under tropical conditions. **Journal of Hazardous Materials**, v.192, p.54-61, 2011.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2008. Available at: <<http://www.R-project.org>>. Accessed on: 23 Apr. 2012.
- RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. p.233-243. (IAC. Boletim técnico, 100).
- RANA, L.; DHANKHAR, R.; CHHIKARA, S. Soil characteristics affected by long term application of sewage wastewater. **International Journal of Environmental Research**, v.4, p.513-518, 2010.
- REGO, J. de L.; OLIVEIRA, E.L.L. de; CHAVES, A.F.; ARAÚJO, A.P.B.; BEZERRA, F.M.L.; SANTOS, A.B. dos; MOTA, S. Uso de esgoto doméstico tratado na irrigação da cultura da melancia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.155-159, 2005.
- SANTOS, H.G. dos; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; OLIVEIRA, J.B. de; COELHO, M.R.; LUMBRERAS, J.F.; CUNHA, T.J.F. (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- SEGAL, E.; DAG, A.; BEM-GAL, A.; ZIPORI, I.; EREL, R.; SURYANO, S.; YERMIYAHU, U. Olive orchard irrigation with reclaimed wastewater: agronomic and environmental considerations. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.140, p.454-461, 2011.
- SIMS, J.T. Soil pH effects on the distribution and plant availability of manganese, copper, and zinc. **Soil Science Society of American Journal**, v.50, p.367-373, 1986.
- SINGH, A.; SHARMA, R.K.; AGRAWAL, M.; MARSHALL, F. Effects of wastewater irrigation on physicochemical properties of soil and availability of heavy metals in soil and vegetables. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.40, p.3469-3490, 2009.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.
- TUCCI, C.E.M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. de M. **Gestão da água no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2001. 156p.
- TZANAKAKIS, V.A.; PARANYCHIANAKIS, N.V.; ANGELAKIS, A.N. Nutrient removal and biomass production in land treatment systems receiving domestic effluent. **Ecological Engineering**, v.35, p.1485-1492, 2009.
- WITTBRODT, P.R.; PALMER, C.D. Reduction of Cr(VI) by soil humic acids. **European Journal of Soil Science**, v.48, p.151-162, 1997.

---

Recebido em 13 de janeiro de 2012 e aprovado em 29 de março de 2012