



PRÊMIO PAU-BRASIL: MELHOR ARTIGO TÉCNICO SOBRE MEIO AMBIENTE NO ABTCP-PI 2005.

Implicações do uso de efluente de fábricas de celulose em plantios de eucalipto

Evaluation of the Use of Pulp Mill Effluent in Eucalyptus Plantation

Autores: Ana Augusta Passos Rezende – UFV (Viçosa, Brasil)

Antonio Teixeira de Matos – UFV (Viçosa, Brasil)

Cláudio Mudado Silva – UFV (Viçosa, Brasil)

Palavras-chave: Resíduos industriais. Indústria de celulose. Reuso de águas residuais. Fertirrigação de eucalipto

RESUMO

A indústria de celulose requer um grande volume de água em seu processo fabril, o que, conseqüentemente, produz um grande volume de efluentes cujas características variam de acordo com seu processo fabril. A disposição no solo de efluentes do processo de fabricação da polpa celulósica, via fertirrigação, torna-se uma opção atrativa para a destinação final destas águas residuárias. Além de operar como um processo suplementar aos sistemas de tratamento existentes, reduzindo a carga de efluente lançada no corpo d'água receptor, constitui uma fonte suplementar de água e nutrientes para as plantas. Este trabalho apresenta uma abordagem do uso de efluente tratado da indústria de celulose em fertirrigação de eucalipto, discutindo as implicações na adoção desta prática. Caracterizou-se o efluente do tratamento secundário do processo de fabricação de celulose branqueada e avaliou-se a viabilidade do uso deste efluente na fertirrigação do eucalipto; investigan-

Abstract

Land application of treated pulp mill effluent through fertirrigation appears to be an attractive option for eucalyptus nutrition and water supply. It also constitutes a supplementary treatment process or final disposal of the mill effluent. The aim of this study was to investigate and evaluate the effects of eucalyptus fertirrigation using a bleached kraft pulp mill treated effluent (BKME) on characteristic soils from Brazilian eucalyptus plantations. Biologically treated effluent was characterized and used in controlled environment (greenhouse) experiments to investigate the effects of eucalyptus fertirrigation at different application rates. These rates were defined according to the load of the predominant BKME cation, sodium (t sodium.ha⁻¹). The main results observed after BKME application over a six month period conducted to a different manage practices according to the level of nutrients in the fertirrigation, the risk of groundwater contamination, the plant growth rate and biomass production, and the effects of salt accumulated in the root zone. In general, the good response of the soils-plant system under different effluent application rates confirms the possibility of agricultural use of BKME.

Keywords: Wastewater. Pulp mill effluent. Eucalyptus fertirrigation. Land disposal

do-se, por meio de experimentos em ambientes controlados, os efeitos da fertirrigação do eucalipto em solos de áreas potenciais de plantio. Os principais resultados das avaliações realizadas após a fertirrigação por um período de seis meses, com taxas de aplicação do efluente correspondentes a aplicações de 0 a 8 t ha⁻¹ de sódio, delinearam formas de manejo durante a aplicação do efluente, considerando neste trabalho os efeitos na disponibilidade

de água, efeitos nas características do solo, como a vulnerabilidade para contaminação das águas subterrâneas. O presente trabalho de pesquisa permitiu avançar no estudo de viabilidade da fertirrigação com água residuária tratada do processo kraft de fabricação da celulose branqueada no manejo de florestas plantadas de eucalipto, de forma a garantir sua sustentabilidade, tendo em vista seu potencial de uso no atual cenário nacional: tendên-

cia à escassez de recursos hídricos, grande volume de efluentes gerado na fabricação da celulose, extensas áreas de plantio de eucalipto próximas à geração de efluentes, grande demanda hídrica e nutricional dos plantios e necessidade constante de melhoria do desempenho ambiental das empresas.

INTRODUÇÃO

A indústria de celulose e papel é considerada uma das atividades mais bem-sucedidas do setor industrial brasileiro de base florestal.

A matéria prima para o processo de fabricação da celulose no Brasil é proveniente, em sua maior parte, de florestas plantadas de eucalipto. Estas florestas planejadas, dependendo das condições climáticas e da disponibilidade de água e nutrientes no solo, podem proporcionar produtividades superiores a $50 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ (Barros, 2000).

Contudo, as elevadas taxas de crescimento das espécies de eucalipto impõem elevada demanda sobre os recursos do solo, em especial água e nutrientes, exigindo um manejo intenso do sistema solo-água-planta. A seleção de técnicas de manejo compatíveis com a capacidade do sítio em fornecer água e nutrientes para as plantas constitui um dos aspectos fundamentais para garantir a sustentabilidade florestal, isto é, a manutenção ou o incremento da produção florestal, ao longo de rotações ou de colheitas sucessivas. A sustentabilidade florestal dependerá, primariamente, da manutenção dos fluxos de água e nutrientes em níveis adequados à satisfação das respectivas demandas pelas árvores, observando-se a conservação do solo e a qualidade do solo, da água e ar, bem como do habitat silvestre (Barros & Comerford, 2002). Esta sustentabilidade estará comprometida se as técnicas de manejo levarem ao uso excessivo da água de recarga dos aquíferos, tendo em vista a crescente escassez de recursos hídricos e a deterioração de sua qualidade, a qual é essencial tanto à vida hu-

mana quanto ao processo fabril.

A fertirrigação de florestas plantadas vem sendo aplicada em escala experimental com o objetivo de se agregar às técnicas silviculturais de manejo, visando aumentar a disponibilidade (e ou a eficiência de uso) dos recursos água e nutrientes para o plantio e, conseqüentemente, aumentar a produtividade.

Nos últimos anos os requerimentos legais relativos ao gerenciamento das águas tornaram-se mais restritivos, fazendo-se necessário investigar alternativas para seu reuso e melhoria dos processos de tratamento e disposição final das águas residuárias. Isto fez com que houvesse um crescente interesse na aplicação de águas residuárias municipais e industriais no solo, constituindo, assim, numa forma de adição de água e nutrientes ao ecossistema florestal.

A indústria de celulose está entre aquelas que vêm considerando e empregando a disposição no solo como uma alternativa no gerenciamento de seus resíduos. A indústria de celulose requer um grande volume de água em seu processo fabril, podendo demandar valores acima de 100 m^3 por tonelada de polpa produzida (Carter & Gleadow, 1994). Conseqüentemente, produz um grande volume de efluentes, cujas características variam de acordo com o processo de fabricação utilizado. Assim, a disposição destes efluentes no solo torna-se uma opção atrativa para a destinação final destas águas residuárias. Além de operar como um processo adicional aos sistemas de tratamento existentes, reduzindo a carga de efluente lançada no corpo d'água receptor, constitui, também, uma fonte suplementar de água e nutrientes para as plantas.

As primeiras aplicações do efluente em áreas exploradas com silvicultura ocorreram nos anos 50, na América do Norte, a maior parte em projetos experimentais ou pilotos (Crawford, 1958; Westnhouse, 1960). Nos anos

80, a aplicação do efluente ficou limitada a poucas fábricas e apenas a áreas não florestadas. Várias características, apontadas por Nutter e Red (1985) como únicas do sistema florestal, contribuíram para este cenário: (a) o fato de florestas requererem grandes áreas de aplicação, devido à baixa assimilação de nutrientes por espécies florestais; (b) a grande distância entre as fábricas e as áreas plantadas, inviabilizando economicamente a aplicação; e (c) o pouco conhecimento dos aspectos biológicos associados à prática. Entretanto, deve-se levar em consideração o fato de que a indústria de celulose, nos últimos anos, vem inovando suas tecnologias, principalmente com a adoção de tecnologias mais limpas, o que vem refletindo diretamente nas características do efluente final. Reporta-se, também, estudos visando a aplicação do efluente da fabricação da celulose em silvicultura como uma opção atrativa para se alcançar operações que levassem a um crescente fechamento de circuito para o setor florestal (Smith et al., 1997; Thacker, 1985).

A experiência acumulada sobre o assunto indica que o processo de disposição de efluente no solo deve ser entendido, planejado e gerenciado com o mesmo grau de atenção e importância dado a qualquer outro processo operacional. Dada a complexidade da constituição química dos efluentes de fábricas de celulose há, ainda, a necessidade de maiores informações e de melhor entendimento do comportamento, no solo e na cobertura vegetativa, dos seus principais constituintes, bem como das limitações referentes à qualidade da água subterrânea para que se possam estabelecer condições operacionais seguras de sistemas de disposição desses efluentes no solo.

Neste sentido, este trabalho discute, com base em investigação por meio de experimentos em ambientes controlados (casa-de-vegetação), as implicações na adoção da práti-

ca de disposição do efluente do tratamento secundário do processo de fabricação de celulose branqueada (ETFC) no solo, como aborda formas de manejo da aplicação destes efluentes por fertirrigação, além de avaliar os efeitos no ambiente solo-água associados a esta prática.

Disposição de águas residuárias no solo

A terminologia disposição no solo tem sido definida como aplicação planejada e controlada de um resíduo específico sobre a superfície do solo a fim de se alcançar um grau específico de tratamento, por meio de processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem naturalmente no sistema água-solo-plantas (Metcalf & Eddy, 1991; Sanks & Asano, 1976; USEPA, 1981). Nos últimos 20 anos tem sido renovado o interesse nos métodos de disposição/tratamento de resíduos no solo, entendendo as águas residuárias como uma fonte de água e nutrientes, incluindo o uso em plantios florestais (Cromer et al., 1984; Myers et al., 1995; NCASI, 1985; Urie & Red, 1986; Crites & Reed, 1986; Nutter & Red, 1985; Rezende et al., 2001).

O objetivo da disposição de resíduos no solo é a sua destinação final em quantidades que não venham a comprometer os componentes ambientais (solo, água, ar, organismos, etc.). No processo de disposição no solo utiliza-se do sistema solo-plantas para a degradação, assimilação e imobilização dos constituintes da água residuária, bem como dos produtos de sua transformação no meio.

O solo tem normalmente um papel importante na disposição de águas residuárias, atuando como depósito e meio de tratamento para os diferentes constituintes químicos da água residuária. No sentido de identificar o efeito do solo na água residuária, e vice-versa, torna-se importante conhecer as características físicas e químicas do solo antes e após a sua aplicação.

A vegetação constitui outro im-

portante componente do sistema, agindo como extratora de grande parte dos macros e micronutrientes disponíveis, evitando seu acúmulo e a conseqüente salinização do meio e a contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Permite, também, a melhoria de algumas características do solo tais como a sua estrutura, proporcionando aumento da infiltração e percolação de água. As espécies vegetais ao serem selecionadas, segundo Feigin et al. (1991), devem atender a, no mínimo, um dos seguintes objetivos: consumo de água, remoção de contaminantes, tolerância aos sais, produção de biomassa, rápido crescimento, e habilidade de fixação de nitrogênio atmosférico.

A avaliação das características microbianas e bioquímicas das águas residuárias, isto é, do efluente, permite verificar se as mesmas reúnem as condições especificadas pelas normas e critérios de saúde pública, tendo em consideração o tipo de cultura, o solo, a forma de aplicação no solo. O conhecimento das características químicas do efluente permite determinar a taxa de aplicação e os meios pelos quais podem ser minimizados os impactos negativos do mesmo na área destinada à sua disposição.

Os princípios da regulamentação da disposição no solo relacionam-se à manutenção e melhoria da qualidade do sistema solo-plantas com o mínimo risco à saúde humana e a outros receptores ambientais.

MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento com o efluente do tratamento secundário do processo de fabricação de celulose branqueada (ETFC) no solo foi conduzido em casa-de-vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, UFV, e contou com o apoio dos Laboratórios de Qualidade da Água e de Análise Química de Resíduos do Departamento de Engenharia Agrícola/UFV, Laboratório de Papel e Celu-

lose do Departamento de Engenharia Florestal/UFV e Laboratório de Física do Solo e de Solos Florestais do Departamento de Solos/UFV.

O experimento compreendeu 90 unidades experimentais, constituídas por colunas contendo amostras de material de três tipos de solos e plantas de eucalipto, submetidas a cinco diferentes lâminas de fertirrigação com efluente tratado do processo de fabricação da celulose, em aplicações diárias por gotejamento (0; 114,6; 286,5; 515,7 e 1146 mm ano⁻¹), correspondente a cargas de aplicação de 0; 0,85; 2,12; 3,80 e 8,50 t ha⁻¹ ano⁻¹ de Na⁺. Numa segunda condição, adicional à fertirrigação com efluente em 45 das unidades experimentais, houve aplicação, a partir do nonagésimo dia de cultivo, de lâminas de água que totalizaram uma precipitação média anual de 1300 mm.

As colunas foram preenchidas com solos Argissolos e Neossolos Quartzarênicos de áreas representativas de plantio de eucalipto, previamente secos ao ar, destorroados e devidamente homogeneizados e passados em peneira de malha de 4 mm, acondicionando-se camada por camada de forma a repetir posições idênticas às encontradas no campo.

A água residuária utilizada no experimento consistiu do efluente do sistema de tratamento secundário do processo de fabricação de celulose kraft branqueada, constituído por um sistema de lagoas aeradas facultativas em série, seguido por uma lagoa de decantação.

O estudo abrangeu, também, o uso de um material genético, proveniente de híbrido clonal de *Eucalyptus grandis* x *E. Urophylla*. Ao longo de 180 dias de cultivo das plantas de eucalipto foram monitorados: a temperatura ambiente, as lâminas de água evapotranspirada, as lâminas de água de chuva simulada, as características físicas e químicas da água drenada das colunas, os sintomas visuais de defi-

ciência ou toxicidade nas plantas, bem como as características morfológicas (tamanho, diâmetro de caule, coloração) das plantas. Ao final deste período, procederam-se as análises das características físicas e químicas dos solos das unidades experimentais, em amostras coletadas em cinco profundidades nas colunas, bem como a análise química do material foliar das plantas de eucalipto. Para a determinação da maioria dos atributos empregou-se metodologia descrita em EMBRAPA (1997) e APHA (1995).

Nas análises estatísticas verificou-se a normalidade dos dados e a homogeneidade das variâncias entre os dois experimentos, optando-se pela análise conjunta dos dois experimentos. Os dados foram interpretados por meio de análise de variância e de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação da qualidade do efluente tratado do processo de fabricação da celulose (ETFC) como água para água para aproveitamento agrícola

As informações encontradas na literatura sobre qualidade de água para aproveitamento agrícola referem ao seu uso como água de irrigação. Nesta técnica as lâminas aplicadas são sempre muito maiores do que no caso de uso como fertirrigação. Entretanto, as informações encontradas podem ser úteis para predição dos problemas que podem ocorrer com o solo e plantas.

Alguns fatores relevantes para avaliação das águas de irrigação compreendem: riscos à saúde, a salinidade, a sodicidade, a toxicidade específica de íons, a concentração de nutrientes (N, P) e os bicarbonatos, o pH, o cloro residual e a possibilidade de alteração da permeabilidade do solo.

Quanto à limitação da água de irrigação relativa aos riscos à saúde, advindos de sua qualidade microbiológica, segue-se os critérios adotados pela Agência de Proteção Ambiental norte americana, USEPA (1981), e os

recomendados pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 1989). Ressalta-se que são recomendados pela USEPA, para a irrigação irrestrita ou irrigação por aspersão em qualquer situação, padrões microbiológicos de qualidade de águas residuárias semelhantes aos padrões de potabilidade de água, enquanto os critérios estabelecidos pela OMS, para irrigação irrestrita, são mais rigorosos quanto à presença de ovos de helmintos, mas flexíveis quanto à qualidade bacteriológica, e omissos em relação a vírus e protozoários.

Diretrizes para interpretação da qualidade da água para fins de irrigação, formuladas prevendo o risco potencial à produção da cultura associada à irrigação por longo período, são apresentadas por Ayers e Westcot (1991). Uma classificação da qualidade da água para irrigação em termos de risco de salinidade, normalmente mensurada pelos sólidos dissolvidos totais (SDT) ou pela condutividade elétrica, foi elaborada por McNeal (1981).

Considerando as características do ETFC apresentadas na Tabela 1 e os critérios usuais de qualidade das águas de irrigação (Ayers & Westcot, 1991; USEPA, 1981; UNEP, 1996; USEPA, 1992; OMS, 1989) pode-se inferir quanto à qualidade deste efluente, em termos do seu potencial fertilizante e restrições de uso:

- o efluente tratado do processo kraft possui cor intensa, atingindo valores superiores a 1000 mg.L⁻¹ de Pt. Entretanto, isso não constitui fator limitante para seu uso em fertirrigação já que, segundo Juwarker & Subrehmany (1986), a cor é proveniente, principalmente, da presença de derivados de lignina, que não traz efeitos tóxicos às plantas quando presente no solo; e este tem mostrando capacidade em removê-la. A alta intensidade de cor dos efluentes tem sido mais um fator de incentivo para considerar a aplicação no solo, evitando, assim, causar problemas estéticos nos corpos

d'água receptores.

- os altos valores de condutividade elétrica encontrados no efluente (2,5 a 4,5 dS. m⁻¹) indicam elevada concentração de íons em solução. Considerando-se o guia do USEPA (1981) para salinidade da água de irrigação, o ETFC se enquadra como água que deve ser usada para culturas tolerantes em solos permeáveis, requerendo cuidadoso manejo. De acordo com Ayers e Westcot (1991), o ETFC é classificado como água com restrição severa do solo, isto, caso não ocorra remoção dos sais acumulados nesse meio.

- o pH pode ser o fator limitante à aplicação dos efluentes no solo, já que condições de alta acidez podem trazer problemas de toxicidade, como disponibilizar alguns metais, enquanto que alcalinidade pode proporcionar indisponibilização de grande parte dos micronutrientes essenciais às plantas. Pelos valores de pH do ETFC, entre 6,9 e 8,2, o efluente caracteriza-se como levemente básico, possivelmente em razão da presença de alcalinidade, se enquadrando na faixa de pH considerada ótima para uso na agricultura, permitindo, assim, segundo Gheyi et al. (1997), prever os efeitos adversos relacionados à disponibilidade de nutrientes.

- as concentrações de nitrogênio presente no ETFC indicam que as fontes de nitrogênio prontamente disponíveis para as plantas são pequenas, havendo necessidade de complementação nutricional com outra fonte de N no caso do uso do efluente para fertirrigação de culturas agrícolas. Os resultados indicam que se por um lado o efluente não representa a possibilidade da substituição de adubações nitrogenadas nos cultivos de eucalipto, por outro indica pequeno risco de contaminação de águas subterrâneas com nitrato. A lixiviação de nitrato em decorrência da aplicação do efluente da indústria de celulose no solo é, por razão das baixas concentrações de ni-

trogênio no efluente, menos preocupante quando comparado ao risco de aplicação de esgoto doméstico.

- as concentrações de potássio, cálcio, magnésio e enxofre, comparativamente ao nitrogênio inorgânico e ao fósforo, podem ser consideradas relativamente altas, viabilizando o aproveitamento do ETFC para fornecer esses nutrientes como substituinte de fertilizantes comerciais. O ETFC seria capaz de suprir a demanda total de potássio e cálcio para a maioria das culturas, mas apenas parcialmente a demanda de fósforo nos tratamentos com lâminas de aplicação mais altas. Na prática, se for feita a complementação de adubação, seria possível dispensar totalmente a adubação potássica e reduzir a dose de fósforo. A adubação com enxofre e fósforo para taxas mais baixas permaneceria necessária. Estes dados revelam que a aplicação do ETFC pode ser suficiente para o atendimento da demanda da maioria das culturas e, de outro, a necessidade de manejo adequado, cotejando o balanço hídrico e de nutrientes.

- em relação aos micronutrientes, o ETFC apresenta, em geral, baixas concentrações, sendo capaz de suprir as demandas de Cu, Fe, B, Mn e Mo (estes em excesso para taxas mais altas), sendo necessária a complementação com Zn para a maioria das culturas. Nutrientes em excesso podem comprometer a produtividade e a qualidade das culturas bem como resultar em problemas ambientais, principalmente por lixiviação e contaminação do lençol freático. Os valores de ferro no efluente encontram-se dentro dos limites de qualidade da água para irrigação segundo UNEP (1996), porém indicam risco moderado de entupimento de gotejadores caso o efluente seja aplicado no solo utilizando-se este método. O mesmo não é observado para a concentração de manganês.

- a concentração de sódio no efluente pode ser encontrada na faixa de

450 a 1000 mg.L⁻¹, com valores médios em torno de 750 mg.L⁻¹. Estas concentrações altas de sódio constituem, sem dúvida, o fator mais limitante para o uso dessas águas na fertirrigação de culturas agrícolas. Concentrações superiores a 70 mg.L⁻¹ já apresentam grau de restrição, de leve a moderado, para uso em irrigação por aspersão, podendo apresentar problemas de toxicidade.

- o alto valor da Razão de Adsorção de Sódio (RAS em torno de 26), em consequência da alta concentração de Na e da concentração relativamente baixa de Ca e Mg, envolve riscos como de dispersão de argila, de selamento de poros do solo, com conseqüente redução da taxa de infiltração de água no solo e maior susceptibilidade à erosão em decorrência da intensificação do escoamento superficial. Estes riscos não são muito altos uma vez que a condutividade elétrica também é alta. Sob o ponto de vista de efeitos na permeabilidade do solo, o ETFC apresenta grau de restrição de leve a moderado para uso como água de irrigação.

Águas para irrigação com RAS entre 4 e 9 são consideradas de pequeno risco no que refere-se à dispersão da argila e, por conseqüência, à permeabilidade do solo. De acordo com a literatura, alguns efluentes combinados de fábricas de celulose possuem RAS, nesta faixa sendo, assim, potencialmente adequadas para a fertirrigação (Cromer et al., 1984). No entanto, as baixas condutividades elétricas de alguns efluentes setoriais de fábricas de celulose, como aqueles procedentes do cozimento e da lavagem da polpa, aliadas à relativamente elevada RAS podem trazer problemas físico-químicos ao solo, destruindo sua estrutura e, por conseqüência, sua macroporosidade. Para aproveitamento dessas águas residuárias, misturas devem ser realizadas ou deve-se prover a solução de cálcio e magnésio

para diminuir o valor da RAS.

- o íon cloreto, como contra-íon do íon sódio na formação de sais, está presente, também, em altas concentrações no efluente do tratamento secundário. As concentrações de cloreto no efluente de indústrias de celulose situam-se na faixa de 120-350 mg.L⁻¹, o que pode comprometer a utilização do efluente para fertirrigação, uma vez que tais concentrações podem causar danos severos às folhas das plantas com aplicação do efluente por aspersão.

- a concentração de alumínio no ETFC apresenta valores inferiores a 12 mg.L⁻¹. O alumínio é um elemento tóxico às plantas, com limites máximos recomendados de 5 e 20 mg.L⁻¹, para irrigação contínua e por períodos de até 20 anos, respectivamente, conforme UNEP (1996). Não obstante, deve-se ressaltar a elevada tolerância do eucalipto ao alumínio (Neves et al., 1982).

- as baixas concentrações de metais pesados nos efluentes tratados apresentam valores abaixo do permitido para lançamento em corpos d'água receptores, conforme estabelecido na Resolução CONAMA 20/86 (CONAMA, 1986). O cádmio constitui um dos metais pesados que proporcionam maior risco ambiental quando disposto no solo, em vista de sua mais alta mobilidade e sua elevada toxicidade mesmo em concentrações muito baixas. Os valores de concentração de cádmio no ETFC encontram-se baixos, inferiores a 0,020 mg.L⁻¹.

- a concentração de material orgânico clorado no ETFC, mensurado pela concentração de AOX (Adsorbable organic halogen), variam em torno de 4,0 mg.L⁻¹ de cloreto. O efluente aplicado ao solo, mesmo depois de submetido ao tratamento secundário, pode ainda conter uma significativa concentração de compostos orgânicos de alto peso molecular de elevada toxicidade para a biota. Acredita-se que

estes compostos remanescentes no efluente após o tratamento secundário, por serem de alto peso molecular, sejam fisicamente retidos e degradados nas primeiras camadas do solo, conforme discutido por Kookana e Rogers (1995).

- a concentração de sólidos suspensos, da ordem de 60 mg.L⁻¹, indica moderado risco de entupimento de gotejadores (Ayers & Westcot, 1991), caso seja este o método escolhido para a aplicação do efluente. Em efluentes não tratados, os sólidos em suspensão são constituídos, predominantemente, por fibras e, por esta razão, podem proporcionar entupimento de tubulação e emissores hidráulicos (Adin & Sacks, 1991 e Ravacha et al., 1995). Os sólidos suspensos presentes no efluente final são de caráter biológico, constituídos essencialmente de flocos biológicos. Assim, no que se refere ao parâmetro sólidos suspensos, a magnitude da concentração destes sólidos biológicos no efluente é que irá viabilizar ou não o seu aproveitamento em fertirrigação com aplicações por gotejamento. Os sólidos suspensos contribuem também, a princípio, para problemas de colmatção da superfície do solo (Braile, 1979).

- a presença de coliformes fecais é verificada em contagens inferiores a 1000 CF/100 mL, valor do padrão bacteriológico da OMS para irrigação irrestrita. Apesar de ocorrer a contribuição de esgoto doméstico na geração do efluente final das fábricas, esta constitui parcela pouco significativa do volume total. Em termos de ovos de helmintos, o tempo de detenção nas lagoas de estabilização é plenamente suficiente para que ocorra sua total remoção. Quanto aos critérios de qualidade recomendados pela USEPA, cujos valores são semelhantes à água potável, espera-se que com a desinfecção do ETFC estes possam ser atingidos, em termos microbiológicos.

Definições do método e das taxas de aplicação

O método e a taxa de aplicação da água residuária devem ser coerentes com as características do sistema solo-planta.

Segundo Metcalf & Eddy (1991), existem três métodos básicos de aplicação de águas residuárias no solo: infiltração rápida (métodos de inundação ou infiltração-percolação), escoamento superficial, e infiltração lenta ou irrigação, dentre outros processos naturais como áreas alagadas construídas (wetlands), aplicação subsuperficial e aquícultura.

A irrigação consiste do processo mais utilizado ultimamente, sendo o efluente aplicado por aspersão, de forma localizada ou por superfície. Em geral, o projeto de sistemas de aplicação por irrigação é controlado pela taxa de aplicação hidráulica ou lâmina de aplicação, ou seja, pelo volume de água residuária aplicada por unidade de área por um determinado período de tempo. No caso de irrigação de culturas agrícolas, os sistemas são projetados pelo requerimento de água para produção do cultivar, a taxa de aplicação hidráulica constitui a quantidade de água a ser usada pela planta, sob condições não restritas, e devem ser compatíveis com as práticas agrícolas, as características do solo e da água, o relevo, as condições climáticas, o tipo de cultura irrigada, a técnica de irrigação, como também com os riscos de salinização do solo e de contaminação de águas subterrâneas e a vazão da água residuária a ser disposta no solo (Ghassemi, 1995; Overcash & Pal, 1979).

O uso do termo fertirrigação com água residuária é recomendado em substituição ao de infiltração lenta ou irrigação, entendendo que o uso de água residuária como fonte de água para satisfação das necessidades hídricas da cultura poderá comprometer a qualidade do solo e águas subterrâneas, como o desenvolvimento das plantas (Matos, 2003; Matos et al. 2003).

Dessa forma, o referencial para definição das taxas de aplicação deixa de ser lâminas, definidas por critérios exclusivamente hidráulicos ou calculadas com base na evapotranspiração da cultura, e a taxa de aplicação passa a ser calculada com base no constituinte presente (parâmetro limitante), proporcionalmente em maior quantidade, considerando a capacidade do solo e das culturas de assimilar o resíduo aplicado. Neste caso, podem ser considerados os nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio ou mesmo elementos tóxicos que passam a ser fatores limitantes, tais como sódio, cloro, DBO e metais pesados. Em alguns casos, o fator de controle constitui a taxa de carga orgânica, como no caso de águas residuárias muito concentradas. Em algumas águas residuárias industriais, outros fatores devem ser levados em consideração, tais como carga de sais, ou carga de metais. Entretanto, em geral, para águas residuárias com valores de DBO iguais ou inferiores a 1000 mg.L⁻¹, as taxas de aplicação podem ser definidas com base na taxa de aplicação hidráulica (Rowe & Abdel-Magid, 1995).

A fertirrigação pode ser feita utilizando-se técnicas de aplicação idênticas às utilizadas para irrigação convencional (aspersão, de forma localizada ou por superfície), porém, caso estejam em solução íons ou substâncias que possam trazer problemas se aplicados sobre o dossel das plantas, recomenda-se a aplicação localizada (microaspersão ou gotejamento) (Costa e Brito, 1994).

No que se refere à irrigação localizada ressalta-se, porém, que se deve levar em conta a qualidade da água sob o ponto de vista de possível entupimento de emissores, causados por fatores de ordem física, química e/ou biológica (Leon & Cavallini, 1999). O entupimento nos sistemas pode ocorrer devido a um fator ou combinação de fatores, ou seja: presença de altas concentrações de matéria sus-

Tabela 1: Caracterização do efluente do tratamento secundário da fabricação da celulose

Parâmetros	Unidade	Valor médio ¹
Cor	mg L ⁻¹	1369
pH	-	7,58
Sólidos totais (ST)	mg L ⁻¹	2446
Sólidos dissolvidos Totais (SDT)	mg L ⁻¹	1789
Sólidos em suspensão (SS)	mg L ⁻¹	60,0
Sólidos sedimentáveis	mL.L ⁻¹	0,25
DQO ^{3/}	mg L ⁻¹	375
DBO ^{4/}	mg L ⁻¹	68
C.E. ^{5/}	dS m ⁻¹	3,4
Sódio (Na)	mg L ⁻¹	742,48
Cálcio (Ca)	mg L ⁻¹	49,44
Magnésio (Mg)	mg L ⁻¹	7,6,86
RAS ^{6/}	-	26,2
Nitrogênio Kjeldhal	mg L ⁻¹	6,8
amônio	mg L ⁻¹	1,69
nitrato	mg L ⁻¹	0,00
Fósforo (P)	mg L ⁻¹	1,074
Potássio (K)	mg L ⁻¹	27,357
Enxofre (S)	mg L ⁻¹	116,65
Cobre (Cu)	mg L ⁻¹	0,010
Ferro (Fe)	mg L ⁻¹	0,574
Zinco (Zn)	mg L ⁻¹	0,048
Manganês (Mn)	mg L ⁻¹	0,305
Alumínio (Al)	mg L ⁻¹	3,45
Boro (B)	mg L ⁻¹	0,170
Cádmio (Cd)	mg L ⁻¹	0,001
Cobalto (Co)	mg L ⁻¹	0,005
Cromo (Cr)	mg L ⁻¹	0,135
Mercúrio (Hg)	mg L ⁻¹	0,016
Molibdênio (Mo)	mg L ⁻¹	0,029
Níquel (Ni)	mg L ⁻¹	0,016
Chumbo (Pb)	mg L ⁻¹	0,027
Silício (Si)	mg L ⁻¹	5,001
Vanádio (V)	mg L ⁻¹	0,009
Cloreto (Cl)	mg L ⁻¹	493
Sulfato (SO ₄ ⁻²)	mg L ⁻¹	426,12
Carbonato	mg L ⁻¹	0
Bicarbonato	mol _e L ⁻¹	8,3
AOX ²	mg L ⁻¹ de Cl	4,59
Coliforme Total	NMP/100mL	< 5000
Coliforme fecal	NMP/100mL	< 1000

1/ Valores médios de determinações mensais, durante monitoramento do experimento. 2/ Halogênios orgânicos adsorvíveis; 3/ Demanda química de oxigênio. 4/ Demanda bioquímica de oxigênio. 5/ Condutividade elétrica. 6/ Razão de adsorção de sódio dada por $RAS = Na^+ (Ca^{+2} + Mg^{+2})^{-1/2}$, em que os teores de Na⁺, Ca⁺² e Mg⁺² são em cmolc.L⁻¹.

pensa (material orgânico e material inorgânico); precipitação de compostos de cálcio e magnésio, como também fertilizantes dissolvidos (fosfato, amônia, ferro, zinco, cobre e manganês) e metais pesados na água; e presença e crescimento de algas, bactérias, e outros organismos na água. Não se tem, ainda, estudado qual destes fatores e suas combinações que poderiam causar maior problema de entupimento (Sandri et al., 2001; Leon & Cavallini, 1999; Metcalf & Eddy, 1999; Oron et al., 1980).

No caso de efluentes do processo de fabricação da celulose kraft, o elemento sódio passa a ser o fator limitante, indicando a utilização da técnica de aplicação do efluente localizada (gotejamento).

Efeitos da aplicação do ETFC nas características físicas e químicas do solo

Os Argissolos (solos PAd1 e PAd2), empregados no experimento, têm caracteristicamente o horizonte superficial (A) mais arenoso e o horizonte subsuperficial (B) com coloração amarelada e textura média a argilosa, o que condiciona redução significativa, em profundidade, da permeabilidade, são de baixa fertilidade natural, possuindo baixa capacidade de troca catiônica, sendo pobres em ferro e em bases trocáveis.

Os Neossolos Quartzarênicos (RQo) compreendem solos arenosos, com distribuição granulométrica que enquadra nas classes texturais areia e areia franca (% areia - % argila > 70%) e ligeiro aumento na percentagem de argila com a profundidade do perfil. São solos excessivamente drenados, com permeabilidade rápida ao longo de todo o perfil, porosos, pouco suscetíveis à erosão, sendo predominantemente ácidos, com saturação por bases baixa. Apresentam baixos teores de matéria orgânica e de nutrientes, os quais decrescem com a profundidade.

Em geral, verifica-se que as classes de disponibilidade de água dos so-

Tabela 2: Características químicas^{1/} das amostras dos solos usados nas colunas do experimento

Solo ^{2/}	Profundidade	pH	P	K	Na	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	CTC (t)	CTC (T)	V
		H ₂ O	mg.dm ⁻³			cmolc.dm ⁻³					%
PAd1	0-10cm	4,67	19,06	16	10	0,48	0,19	0,72	1,47	6,23	12,0
	10-60cm	4,79	3,20	10	11	0,71	0,20	0,72	1,71	5,68	17,4
	60-100cm	4,59	0,56	9	7	0,15	0,06	0,96	1,22	3,43	7,6
PAd2	0-10cm	4,79	4,86	9	10,0	0,20	0,11	0,36	0,73	3,01	12,3
	10-60cm	4,90	0,86	4	6,0	0,27	0,16	0,24	0,71	2,78	16,9
	60-100cm	4,88	0,47	8	6,0	0,41	0,11	0,36	0,93	3,01	18,9
RQo	0-30cm	5,51	4,75	6	4,0	0,65	0,23	0,00	0,92	2,7	34,1
	30-60cm	5,59	0,78	1	2,0	0,18	0,04	0,00	0,23	0,56	41,1
	60-100cm	5,50	1,12	1	2,0	0,17	0,05	0,00	0,23	0,82	28

1/ pH em água – relação 1:2,5 ; P - K - Na – Extrator Mehlich 1; Ca - Mg - Al – Extrator KCl 1 mol.L⁻¹ ; CTC (t) – Capacidade de troca catiônica efetiva; CTC (T) – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0; V – índice de saturação por bases. 2/ PAd1- Argissolo Amarelo Distrófico A moderado relevo plano textura média/argilosa; PAd2- Argissolo Amarelo Distrófico A moderado relevo plano textura areno-sa/média; RQo - Neossolo Quartzarênio Órtico textura arenosa.

los são predominantemente baixas, o que pode ser devido à baixa atividade de argila e, principalmente, à relativamente alta relação macro-microporos presente nos solos estudados. A Tabela 2 apresenta as principais características químicas dos solos estudados.

A aplicação de efluente no solo pode ocasionar efeitos indesejáveis nas suas características químicas (Fuller & Warrick, 1985). Uma grande preocupação refere-se ao acúmulo de sais, como resultado de aplicação por longos períodos. Adishesha et al. (1997) não encontraram mudanças significativas nas características do solo submetido, por período de tempo inferior a 3 anos, à fertirrigação com efluente da indústria de celulose e papel. Por outro lado, vários estudos (Cromer et al., 1984; Hansen et al., 1980; Aw, 1994; Hayman & Smith, 1979) abordando efeitos químicos da aplicação de efluente de indústrias de celulose e papel no solo, indicaram altas concentrações de Na⁺, Cl⁻, K₂O, Ca²⁺, e K⁺, além de valores elevados de condutividade elétrica e de razão de adsorção de sódio (RAS), bem como baixa concentração de Mg¹² e outros nutrientes essenciais (Aw et al., 1993; Aw, 1994). A irrigação com efluente não diluído de indústria de celulose e papel pode,

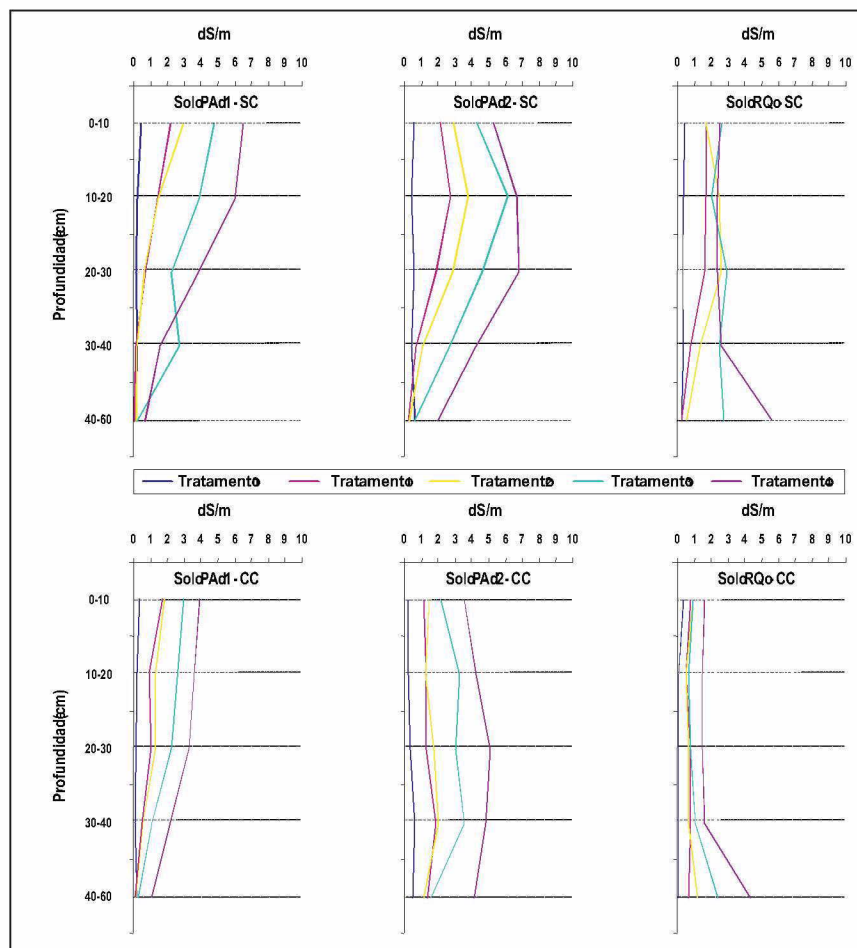


Figura 1: Evolução da condutividade elétrica em cinco profundidades dos solos em estudo, PAd1, PAd2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat. 0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondentes às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

também, ocasionar aumento nos valores de pH do solo, no conteúdo de carbono orgânico, matéria orgânica e nutrientes disponíveis (Johnson & Ryder, 1988; Kannan & Oblisami, 1990a, 1990b; Juwarkar & Subrahmanyam, 1986).

No presente estudo, a condutividade elétrica no extrato de saturação e as concentrações de cloreto disponível e sódio trocável no solo (Figuras 1 e 2) apresentaram comportamento semelhante em todas as taxas de ETFC aplicadas e em todos os solos avaliados. Elevados valores de CEs e altas concentrações de Na trocável e cloreto foram obtidos nas camadas superficiais dos solos das colunas. A razão dos valores de condutividade elétrica acompanhar as variações do Na^+ e Cl^- , está na maior contribuição desses íons na CE do extrato de saturação do solo do que outros íons também presentes, por estarem em maior concentração no ETFC. Nas colunas de solo que receberam as maiores lâminas de aplicação do ETFC, e assim também de sódio, houve aumentos maiores na condutividade elétrica extrato de saturação do solo (Figura 1). Considerando-se os solos que não receberam chuvas simuladas, pode-se verificar um aumento mais significativo na condutividade elétrica ou salinidade das camadas superficiais (0-40cm) dos solos de textura média/argilosa (PA1) e arenosa/média (PA2). Efeito menos expressivo foi observado no solo de textura arenosa (RQo).

Conforme reportado por Johnson e Ryder (1988), surpreendentemente, o aumento na concentração de sódio no solo parece ser independente das taxas de aplicação do efluente. Este aumento no conteúdo de Na pode causar a dispersão da argila do solo, conduzindo a uma pobre infiltração e aeração desse meio. Isto também sugere que a fertirrigação com efluentes da indústria de celulose pode constituir perigo potencial para as culturas.

Para se prevenir o risco de predominância de sódio no solo, deve-se

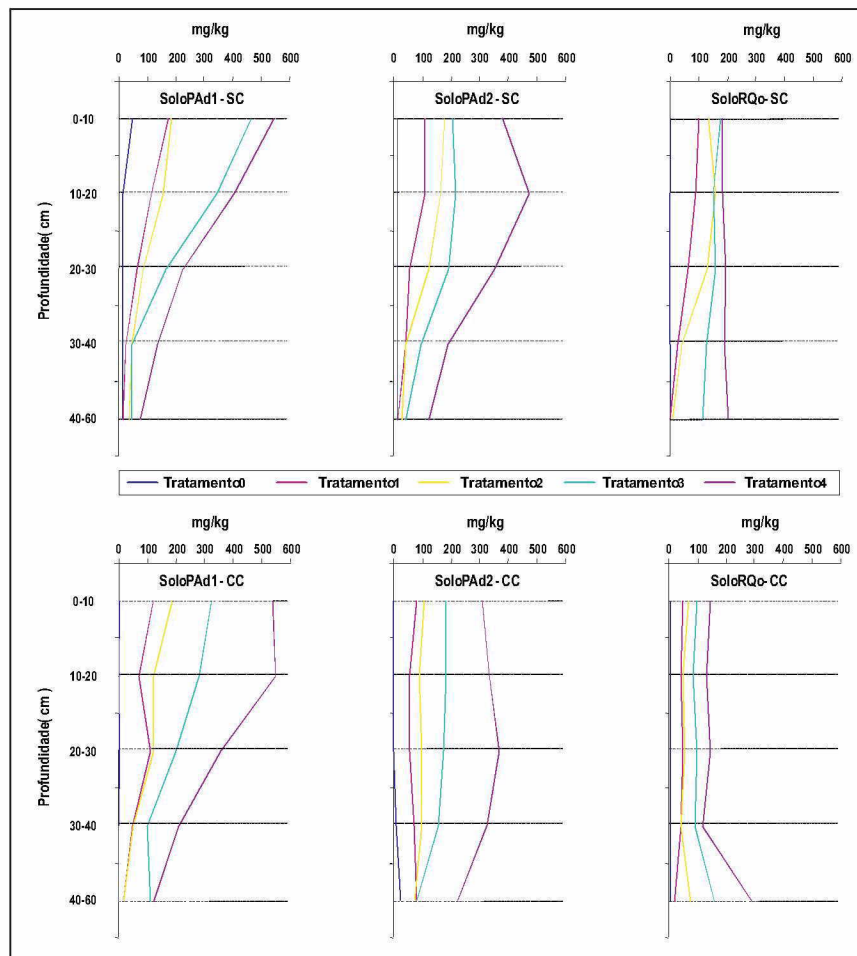


Figura 2: Evolução dos teores de sódio em cinco profundidades dos solos em estudo, PA1, PA2 e RQo, avaliada 180 dias após o plantio de mudas de eucalipto e de aplicação do ETFC, sendo Trat.0, Trat.1, Trat.2, Trat.3 e Trat.4 correspondentes às lâminas aplicadas de 0mm, 114,6mm, 286,5mm, 515,7mm e 1146mm, considerando-se duas condições na condução do experimento: sem simulação de chuva e com simulação de chuva (valores médios de três repetições).

compensar a aplicação do efluente com outras fontes de Ca^{+2} e Mg^{+2} que, aliada a altos índices pluviométricos, podem promover a lixiviação do Na^+ , e o restabelecimento do balanço de cátions. Com isso, nenhuma redução na permeabilidade do solo deve ser observada (Johnson & Ryder, 1988).

A simulação de chuvas, no experimento, proporcionou redução nos valores de condutividade elétrica no extrato de saturação de amostras retiradas em todo o perfil dos solos. Isto vem demonstrar que em períodos mais chuvosos, tal como os apresentados na região litorânea, torna-se pequeno o ris-

co de salinização dos solos em decorrência da aplicação do ETFC como fertirrigação do eucalipto. Suspeita-se que a lixiviação do sódio trocável seja a principal responsável por estes resultados, podendo-se esperar que a utilização de métodos que possibilitem a remoção de sódio do perfil venha controlar também a condutividade elétrica no solo.

Avaliando-se as concentrações de sódio trocável, pode-se verificar que houve variação significativa das concentrações desse cátion em todo o perfil do solo nas colunas em que foi aplicado o efluente (Figura 2). As equa-

ções de regressão ajustadas em função das lâminas de aplicação de ETFC, para diferentes profundidades, mostram comportamentos diferentes dos solos estudados quanto ao sódio. O solo PAd1 apresentou uma tendência de variação do sódio ajustada à função quadrática, enquanto os solos PAd2 e RQo apresentaram aumento linear nas concentrações de sódio com as taxas de aplicação de ETFC ao longo de cada profundidade. Os resultados de concentração de Na trocável obtidos nas amostras coletadas confirmam que esse é o fator mais limitante para a disposição de efluente do secundário no solo, uma vez que há clara concentração desse cátion no perfil. Entretanto, em vista da facilidade com que o Na é também removido do perfil, acredita-se que a disposição do ETFC em solos arenosos ou com sistemas de drenagem artificial implantados possa ser suficiente para proporcionar maior controle da sodificação dos solos.

No neossolo RQo as concentrações de sódio foram mantidas em níveis mais baixos que os encontrados nos argissolos PAd1 e PAd2 para todas as taxas de aplicação de ETFC, não variando ao longo do perfil do solo para os tratamentos com lâminas maiores (515,7 e 1146 mm). No experimento com a simulação de chuva verificou-se tendência de lixiviação desse cátion, uma vez que houve aumento de sua concentração nas camadas mais profundas (Figura 2).

A fácil drenagem do solo RQo possibilitou que efeitos severos de salinização e de redução na permeabilidade pudessem ser evitados, em decorrência da aplicação do efluente, tal como relatado em outros trabalhos com solos de textura arenosa (Cromer et al., 1984; Johnson & Ryder, 1988; Juwarakar & Subrahmanyam, 1986).

Embora o ETFC apresente altas concentrações de sódio (480 a 990 mg.L⁻¹) e relativamente baixas de cálcio (28 a 110 mg.L⁻¹) e magnésio (4 a 11 mg.L⁻¹) o que lhe confere alta ra-

ção de adsorção de sódio (RAS), as elevadas condutividades elétricas minimizaram, de certa forma, os efeitos dispersivos de argila proporcionados pela aplicação desse efluente. A aplicação de ETFC não provocou alteração significativa na percentagem de argila dispersa dos solos PAd2 e RQo das colunas nas diferentes taxas de aplicação do ETFC e nem em decorrência dos solos receberem ou não chuvas simuladas. O solo de textura arenosa, RQo, em razão do pequeno conteúdo de argila que detém, foi o solo que apresentou menores valores de argila dispersa para qualquer taxa de aplicação de sódio. Isto confirma o observado por Johnson & Ryder (1988) e Cromer et al. (1984), solos de textura grossa não apresentaram efeitos de deterioração severos e nenhuma perda na permeabilidade em decorrência da aplicação de efluentes detentores de alta porcentagem de sódio trocável. Variações na porcentagem de argila dispersa foram observadas no solo de textura média/argilosa, PAd1, nas camadas sub-superficiais (20- 30 cm).

Quanto à alteração na concentração de metais pesados no perfil dos solos constatou-se que Cd, Cr, Pb e Ni não chegaram a atingir a última camada nas colunas de solo que receberam a mais elevada taxa de aplicação, o que impossibilitou sua presença em solução na água percolada. A alteração nas concentrações de Cu, Cr, Pb e Ni nos solos submetidos às diferentes taxas de aplicação foi insignificante, tendo sido obtidas baixas concentrações, compreendidas na faixa de não detectável a 2 µg.dm⁻³. De acordo com os dados obtidos e as cargas máximas de aplicação de metais pesados sugeridas pela Comunidade Econômica Européia, citado por Loehr (1984), Simon e Tedesco (1993) e adotados no Estado do Paraná (SANEPAR, 1997) para aplicação no solo, a mais alta taxa de aplicação de ETFC não proporcionou a incorporação de quantidade de Cd, Cr, Ni

e Pb superiores aos valores máximos propostos. Os limites máximos no solo de concentração de metais adotados pelo Estado do Paraná, adaptados da legislação espanhola, expressos em mg.kg⁻¹, são: 1,0 ; 50; 100 e 30, para Cd, Pb, Cr e Ni, em solos de pH inferior a 7.

No que diz respeito à mobilidade, os metais analisados mostraram-se pouco móveis, mesmo com a aplicação de chuvas simuladas, refletindo sua grande afinidade com a fase sólida, mesmo em solos arenosos.

Lixiviação de sais e possíveis riscos de contaminação de águas subterrâneas

Os riscos ambientais na disposição de efluentes de celulose branqueada em curso d'água vêm sendo bem documentados (Dell et al., 1996). Poucos artigos referem-se à avaliação de risco na aplicação de efluente no solo. A maioria dos artigos aborda a disposição no solo do lodo proveniente do tratamento de efluentes (Vasconcelos e Cabral, 1993; Keenan et al., 1990).

Desde que certas substâncias químicas, óleos, solventes ou outras substâncias perigosas e tóxicas foram eliminadas do processo industrial, o efluente secundário da indústria de celulose pode ser considerado como de boa qualidade, no mínimo igual àquela fornecida pelo tratamento secundário de esgoto doméstico. No entanto, quando de sua disposição no solo, a mobilidade dos sais nesse meio pode constituir um problema potencial de poluição para as águas subterrâneas.

A simulação da precipitação pluviométrica foi empregada, neste experimento, com o intuito de avaliar a capacidade de chuvas naturais em lixiviar os sais retidos no solo em decorrência da aplicação do ETFC. Analisando-se a qualidade das amostras do líquido percolado, coletadas nos drenos das colunas de solo, avaliou-se o risco que a prática da fertirrigação com ETFC pode trazer em termos de con-

taminação de águas subterrâneas.

Os Argissolos de textura média/argilosa (PAD1) e arenosa/média (PAD2) apresentaram maior capacidade de retenção de água, não apresentando percolado procedente tanto da aplicação do ETFC quanto da aplicação de chuvas simuladas. O solo de textura arenosa (RQo) apresentou vulnerabilidade para contaminação da água subterrânea, apesar das características físicas e químicas da água percolada indicarem que houve atenuação de alguns parâmetros do efluente aplicado, como redução da DBO em 50% e concentrações mais baixas de micronutrientes e nitrato. Observou-se, para este solo, ganho expressivo na cor do percolado, bem como aumento nas concentrações de elementos como potássio, sódio, cloreto e potássio na taxa de aplicação mais alta em razão das altas concentrações desses íons no efluente e também devido à própria natureza arenosa do solo, resultando em

uma alta taxa de lixiviação, correspondente à lâmina de ETFC de 1146 mm, ou seja, 8 t ha.⁻¹ de sódio.

Em estudos efetuados por Johnson & Ryder (1988) e Cromer et al. (1984), foram observados também aumentos na concentração de alguns contaminantes na água subterrânea. Inicialmente, concentrações mais altas foram encontradas nas camadas superiores do aquífero, apresentando tendência de redução com a profundidade. Aplicações por períodos prolongados (período correspondente a 3 anos) em áreas de disposição de efluentes proporcionaram grande aumento nas concentrações de sódio e cloreto em todas as profundidades, indicando uma distribuição uniforme da solução.

Nos experimentos conduzidos, ficou evidente que, com o aumento da taxa de aplicação, houve aumento proporcional da quantidade de íons móveis no lixiviado. Por outro lado, caso a capacidade de retenção iônica seja

suplantada, mesmo os nutrientes considerados de baixa mobilidade poderão atingir as águas do lençol freático. Solos arenosos proporcionam taxas mais altas de infiltração e mais baixa capacidade de tamponamento aos íons incorporados, sendo, por estas razões, os que mais riscos proporcionam à qualidade das águas subterrâneas.

O potencial de contaminação de águas subterrâneas depende, dentre outros fatores, da profundidade do lençol freático e das características físico-hídricas do meio poroso. O poluente, ao ser incorporado às águas subterrâneas de aquíferos de natureza granular, se dispersa e se difunde de modo generalizado, juntamente com as águas, podendo se estender por longas distâncias, abrangendo extensas áreas. No caso das quantidades incorporadas serem baixas, a diluição dos poluentes nas águas subterrâneas poderá resultar em concentrações permissíveis, de baixa toxicidade para ho-

Tabela 3 - Características do percolado das colunas de solo RQo submetidas a diferentes taxas de aplicação do efluente secundário do processo de fabricação de celulose branqueada (ETFC), com simulação de chuva¹.

Parâmetros	Período de aplicação (dias) ^{2/} Tratamentos ^{3/}															
	114,6 mm				286 mm				515,7 mm				1146 mm			
	90	120	150	180	90	120	150	180	90	120	150	180	90	120	150	180
pH	5,1	6,38	5,05	6,07	6,08	4,45	5,58	6,02	5,54	4,06	5,84	5,84	4,97	4,24	6,66	6,19
Cor mg.L	-	-	-	-	-	123	136	140	90	192	240	259	530	1295	2556	3120
CE dS. m ⁻¹	0,45	0,45	1,07	1,07	0,43	0,81	1,57	1,26	0,87	0,87	2,50	2,38	1,44	2,19	1,73	1,90
Na ⁺ mg.L ⁻¹	16	27	120	2714/	26	70	220	5044/	72	193	522	14104	272	357	397	365 4/
Ca ²⁺ mg.L ⁻¹	10,23	-	-	35,09	49,67	-	-	47,15	55,74	-	-	42,77	35,93	-	-	4,5
Mg ²⁺ mg.L ⁻¹	7,03	-	-	16,31	28,44	-	-	17,71	22,31	-	-	23,16	12,38	-	-	0,392
Cl ⁻ mg.L ⁻¹	56	136	227	187	164	-	186	448	216	-	495	1095	685	667	894	1293
N mg.L ⁻¹	-	-	31,08	15,84	35,84	23,94	21,95	-	47,32	20,19	11,27	10,29	50,82	27,02	15,50	11,06
P mg.L ⁻¹	0,165	-	0,184	0,25	0,111	-	0,175	0,526	-	0,118	0,195	0,200	-	4,27	6,6	5,17
K mg.L ⁻¹	15,69	-	25	85	19	-	46	-	-	50	165	190	-	150	207	200
Cu µg.L ⁻¹	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fe µg.L ⁻¹	1,70	-	-	12,08	1,109	6,18	-	12,30	5,32	-	-	5,197	1,15	2,62	-	2,298
Zn µg.L ⁻¹	0,027	-	-	0,033	0,086	-	-	0,050	0,016	-	-	0,083	0,039	0,070	-	0,026
Mn µg.L ⁻¹	6,39	-	-	4,49	2,908	-	-	6,83	2,746	-	-	5,547	2,486	-	-	0,331
CO mg.L ⁻¹	80,06	48,5	62,3	32,85	131,9	33,03	55,7	71,5	101,3	82,7	130,9	152,5	155	-	-	-
DBO mg.L ⁻¹	30,9	31,14	37,24	24,57	36,66	-	-	32,14	32,77	28,9	-	24,21	30,85	34,67	31,11	31,37
AOX mgCl.L ⁻¹	-	14,55	4,23	4,23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,4	4,0	6,0

1/ valores médios monitorados ao longo do experimento. 2/ dias contados a partir do início de aplicação do ETFC. 3/ Lâminas aplicadas, correspondendo a 0, 0,85; 2,1; 3,8 e 8,45 ton. ha.⁻¹ de Na.

mens e animais. Dependendo da natureza física e química do poluente, alguns podem ser adsorvidos pelo material sólido do aquífero, ficando adsorvido às argilas (Matos, 2001).

Ainda que a profundidade de solo monitorada (55 cm) seja relativamente pequena, os resultados encontrados podem ser utilizados para análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas, no caso da aplicação de diferentes taxas de ETFC no solo arenoso (RQo). O grande potencial de lixiviação nesse solo, maximizado pela baixa interação da fração areia com íons presentes na água do solo, indica que o parcelamento da fertirrigação seja recomendável no caso da necessidade de aplicação de taxas mais elevadas de ETFC.

Comparando-se os valores de concentração obtidos no percolado com aqueles estabelecidos pela Resolução do CONAMA nº20, de 18/06/86 (CONAMA, 1986), para corpo d'águas Classe 1, com os padrões de potabilidade estabelecidos pela PORTARIA Nº 518, de 2004, do Ministério da Saúde (FUNASA, 2004), e com valores típicos encontrados em águas subterrâneas (Mathess & Harzey, 1982; Szikszay, 1993), verifica-se que os mesmos são semelhantes ou suplantam os valores referenciais (Tabela 3).

De uma forma geral, pode-se observar que houve um aumento gradativo nos valores de condutividade elétrica e das concentrações de sódio no percolado ao longo do tempo de aplicação do ETFC, sendo que as maiores taxas de aplicação proporcionaram aumentos mais significativos nos valores destes parâmetros, quando comparados aos obtidos no percolado das colunas testemunhas.

As altas concentrações de sódio no percolado dão indicativos de que o solo arenoso possui permeabilidade suficiente para permitir rápida lixiviação do sódio no perfil. Pode-se verificar, também, tendência das concentrações de sódio, no percolado das colunas que

receberam a lâmina de aplicação de ETFC de 1146 mm, de se estabilizarem em um valor abaixo da concentração afluyente. A diluição da solução do solo com a aplicação de chuvas simuladas proporcionou contínua remoção de sódio por lixiviação, indicando que a pluviosidade local pode ser suficiente para promover lixiviação adequada do sódio do perfil do solo.

Na fertirrigação, o nitrogênio constitui o elemento mais sujeito à lixiviação no solo. Entretanto, enquanto o nitrogênio estiver em sua forma de cátion amônio (NH_4^+), a possibilidade de sua perda por lixiviação é baixa. Em condições normais de solo cultivado, o amônio é oxidado a nitrato (NO_3^-), íon de carga negativa, que move mais livremente com a água do solo. A lixiviação pode ocorrer se o nitrato estiver presente em grandes quantidades no solo antes do plantio, o que não é o caso, ou quando a cultura não estiver utilizando esse nutriente, ou ainda quando a irrigação ou a chuva exceder a capacidade de retenção do solo e o requerimento de umidade da cultura.

O potássio apresentou comportamento no solo muito semelhante ao do sódio, ou seja, acumulou-se até certo ponto, porém ficou susceptível à forte remoção, apresentando tendência de ter sua concentração no percolado das colunas estabilizada com o tempo de aplicação do ETFC. As elevadas concentrações de potássio no percolado das colunas indicam ser relativamente grande a remoção deste nutriente do perfil do solo de textura arenosa, como é o caso do RQo avaliado, principalmente no período chuvoso.

A mobilidade do fósforo no solo é pequena por ser adsorvido fortemente ao complexo argilo-húmico do solo e não apresenta um grave perigo para contaminação das águas subterrâneas. Porém, em solos arenosos, em vista de sua elevada macroporosidade e baixa capacidade de retenção desse nutriente, este quadro pode mudar,

havendo riscos de contaminação das águas subterrâneas. O valor médio de concentração de P encontrado no ETFC foi $1,75 \text{ mg.L}^{-1}$, e no percolado variou de $0,111$ a $5,17 \text{ mg.L}^{-1}$ para as lâminas de aplicação menor (114,6 mm) e maior (1146 mm), respectivamente, sugerindo que houve movimentação de P ao longo do perfil. Estes valores estão dentro da faixa típica para água subterrânea.

Manejo adequado da aplicação

Em muitas técnicas de disposição são comuns períodos de repouso da aplicação da água residuária, como aplicações sazonais, o que permite tempo para a degradação da matéria orgânica pelos microrganismos e para a drenagem da água de forma a restabelecer condições aeróbias. Estes períodos de repouso dependem do método de disposição, do solo, da cultura e de considerações de manejo. Usualmente resultam em variações relativamente grandes nas taxas de aplicação e, conseqüentemente, requerem maiores áreas de estocagem e de aplicação da água residuária.

Os resultados deste estudo indicaram que ocasionais descargas dos sais acumulados na zona radicular seriam necessárias para minimizar seus efeitos na disponibilidade de água e de toxicidade para as plantas. As lâminas aplicadas de chuva simulada mostraram-se suficientes para permitir lixiviação do sódio e cloreto do perfil dos solos estudados. Assim, a aplicação intermitente do efluente, intercalada por períodos com aplicação de água não salina (chuva ou irrigação), deverá possibilitar a remoção de grande quantidade de sais, especialmente nos solos mais arenosos.

A incorporação de corretivos orgânicos, incluindo lodo de indústrias de celulose e esterco bovino, no solo das áreas de aplicação de efluentes constitui, também, uma opção de manejo. Segundo Vasconcelos e Cabral (1993) e U.S.EPA (1981), esta prática propor-

cionou a manutenção da produtividade durante a fertirrigação com efluente, devido ao fornecimento de nutrientes não disponibilizados para as culturas e por contribuir para a melhoria da estrutura do solo, aumentando taxas de infiltração e o potencial de lixiviação do sódio.

CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

O presente trabalho permitiu avançar no estudo de viabilidade de uso da fertirrigação com água residuária tratada do processo kraft de fabricação da celulose branqueada no manejo de florestas plantadas de eucalipto, de forma a garantir sua sustentabilidade, tendo em vista seu potencial de uso no atual cenário nacional: tendência à escassez de recursos hídricos, grande volume de efluentes gerado na fabricação da celulose, extensas áreas de plantio de eucalipto próximas à geração de efluentes, grande demanda hídrica e nutricional dos plantios e necessidade constante de melhoria do desempenho ambiental das empresas.

As informações obtidas neste estudo fornecem subsídios para um melhor entendimento do comportamento do ETFC quando aplicado em plantios de eucalipto em Argissolos e Neossolos quartzarênicos, contribuindo para que se possa estabelecer condições seguras de manejo de acordo com a capacidade de assimilação do sistema solo-planta.

O estudo indicou que particularidades de cada solo devem ser consideradas na definição de taxas de aplicação e que a aplicação intermitente do efluente, intercalada por períodos com aplicação de água não salina (chuva ou irrigação), deverá possibilitar a remoção de grande quantidade de sais, especialmente nos solos mais arenosos.

Em geral, o comportamento relativamente bom do sistema solo-planta, quando submetido a diferentes taxas de aplicação do efluente, confir-

ma a possibilidade do aproveitamento agrícola do ETFC.

Estudos futuros devem verificar a influência da aplicação de fertirrigação, em longo prazo, com ETFC nos índices de crescimento do eucalipto, na qualidade do lenho e no rendimento da celulose.

Outro estudo a ser considerado seria com respeito a variação na população microbiana do solo exposto ao efluente tratado de celulose e papel, como em suas atividades enzimáticas, sabendo-se que os microrganismos do solo têm participação vital na degradação de material orgânico incorporado, constituindo importante fonte de enzimas para o meio e são estes organismos os primeiros a deparar com as mudanças ambientais causadas pela disposição dos efluentes.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Aracruz Celulose S.A., cuja parceria e apoio possibilitaram a realização deste trabalho.

6. BIBLIOGRAFIA

- Adin, A.; Sacks, M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 117, n. 6, p. 813-826. 1991.
- Adishesha, H. T.; Purwati, S.; Panggabean, P. R.; Sarief, S. E. Utilization of small soda pulp and paper mill effluent for rice field irrigation. *Wat. Sci. Tech.*, v. 35, n. 2, p. 205-212. 1997.
- American Public Health Association. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. New York : APHA, AWWA, WPCR, 1997.
- Ayers, R.S.; Westcot, D.W. *A qualidade da água na agricultura*. Campi-

na Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1991. 218p.

Aw, M. *Saline pulp and paper mill wastewater reclamation using woody species*. MS. Thesis. Arizona, USA: Northern Arizona University, 1994.

Aw, M.; Wagner, M; R., Tecle; A., Avery, C. Land application system to treat pulp and paper mill wastewater in Arizona. In: *PULPMILL WASTE UTILIZATION IN THE FOREST*. Proceedings... Edmonton, Alberta, Canada, 1993.

Barros, N.F. *Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical*. Gainesville, Florida: University of Florida, 2000. 123p.

BARROS, N.F.; COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V. et al. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. v. 2. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. p. 487-592.

BRAILE, P.M.; CAVALCANTE, J.E. *Manual de tratamento de águas residuárias industriais*. São Paulo: CETESB, 1979. 764p.

Carter, D. N.; Gleadow, P. Water use reduction in chemical pulp mills. In: WILLIAMSON, P. N. (Ed.). *Water Use Reduction in the Pulp and Paper Industry - A monograph*. Vancouver, B.C.: TAPPI, 1994. p. 53-79.

CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil). *Resolução nº 20, de 18 de junho de 1986*. Classifica as águas doces, salobras e salinas do território Nacional, em nove classes, segundo seus usos preponderantes. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 1986.

COSTA, E.F.; BRITO R.A.L. Mé-

todos de aplicação de produtos químicos e biológicos na irrigação pressurizada. In: COSTA, E.F.; VIEIRA, R.F.; VIEIRA P. A. (Ed.). *Quimigação, aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 315p.

Crawford, S. C. Spray irrigation of certain sulfate pulp mill wastes. *Sewage and Industrial Wastes*, v.30, n.20, p. 2306- 2309. 1958.

CRITES, R.W.; REED, S.C. Technology and costs of wastewater application to forest systems. In: *The forest alternative for treatment and utilization of municipal and industrial wastes*. Washington : University of Washington Press, 1986. p. 349-355.

Cromer, R. N.; Tompkins, D.; Barr, N. J.; Hopmans, P. Irrigation of Monterey Pine with wastewater: effect on soil chemistry and groundwater composition. *Journal Environmental Quality*, v.13, n.4, p.539 –542.1984.

Dell, B.; Power, F.; Donald, R.; McIntosh, J.; Park, S.; Pang, L. Monitoring environmental effects and regulating pulp and paper discharges: Bay of Plenty, New Zealand. In: *SERVOS, M. R. et al. (Ed.). Environmental Fate and Effects of Pulp and Paper Mill Effluents*, Delray Beach, FL, USA: St. Lucie Press, 1996. p. 627-636.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise do solo*. 2 ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 247p.

Feigin, A.; Ravina, I.; Shalhevet, J. Irrigation with treated sewage effluent: management for environmental

protection. Berlin: Springer-Verlag, 1991.

Fuller, W. H.; Warrick, A. W. *Soils in waste treatment and utilization*. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1985.

FUNASA. Portaria nº 518/2004, de 29 de dezembro de 2000: aprova o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2004.

Ghassemi, F. *Salinisation of land and water resources: human causes, extent, management and case studies*. Center for Resource and Environmental Studies. Wallingford: CAB International, 1995. 526p.

GHEYI, H. R.; QUEIROZ, J. E., MEDEIROS, J. F. (Ed.). *Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada*. In: *SIMPÓSIO MANEJO E CONTROLE DA SALINIDADE NA AGRICULTURA IRRIGADA*. Anais... Campina Grande: UFPB, 1997. 383p.

Hansen, E. A.; Dawson, D. H.; Tolsted, D. N. Irrigation of intensively cultured plantations with paper mill effluent. *Tappi*, v.63, n.11, p.139-143. 1980.

Hayman, J. P.; Smith, L. Disposal of saline effluent by controlled-spray irrigation. *Journal Water Pollution Control Federation*, v. 51, n. 3, p. 526-530. 1979.

Johnson, B.; Ryder, I. The disposal of pulp and paper mill effluents by spray irrigation onto farmland. In: *Alternative Waste Treatment Systems*, Bhamidimarri, ed., 1988, p 55- 65.

Juwarkar, A. S.; Subrahmanyam, P. V. R. Impact of pulp and paper mill wastewater on crop and soil. *Wat. Sci.*

Tech., v. 19, p. 693-700. 1986.

Kannan, K.; Oblisami, G. Influence of irrigation with pulp and paper mill effluent on soil chemical and microbiological properties. *Biology and Fertility of Soils*, v.10, p.197-201. 1990a

Kannan, K.; Oblisami, G. Influence of paper mill effluent irrigation on soil enzyme activities. *Soil Biol. Biochem.*, v.22, n. 7, p.923-925, 1990b.

Keenan, R. E.; Knight, J. W.; Rand, E. R.; Sauer, M. M. Assessing potential risks to wildlife and sportsmen from exposure to dioxin in pulp and paper mill sludge spread on managed woodlands. *Chemosphere*, v.20, n.10-12, p.1763-1769. 1990.

Kookana, R. S.; Rogers, S. L. Effects of pulp mill effluent disposal on soil. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, v.142, p.13- 64.1995.

Leon, S.G.; Cavallini, J.M. *Tratamento e uso de águas residuárias industriais*. trad. Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1999.110p.

LOEHR, R.A. *Pollution control for agriculture*. New York: Academic Press, Inc., 1984. 455p.

MATHESS, G.; HARZEY, A. *The proper of groundwater*. 1st ed. 1982

MATOS, A. T. *Poluição e seus efeitos*. Brasília: ABEAS/DEA –UFV, 2001. 121p.

MATOS, A.T. *Tratamento e destinação final de resíduos gerados no beneficiamento do fruto do cafeeiro*. In: *ZAMBOLIN, L. (Ed.). Produção Integrada de Café*. Viçosa: UFV; DFP, 2003. p. 647-708.

MATOS, A.T.; BRASIL, M.S.; FONSECA, S.P.P. *Aproveitamento de*

efluentes líquidos domésticos e agro-industriais na agricultura. In: III Encontro de Preservação de Mananciais da Zona da Mata Mineira, Viçosa, 2003. Anais... Viçosa: ABES, 2003. p.25 -79.

McNeal, B. L. Evaluation and Classification of Water Quality for Irrigation. In: YARON D. (Ed.). Salinity in Irrigation and Water Resources, New York: Marcel Dekker Inc., 1981. p. 21-45.

Metcalf & Eddy. Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse, McGraw - Hill Inc., 1991.

MYERS, B.; WARREN, B.; FALKINER, R.; OBRIEN, N.; POLGLASE, P.; SMITH, C.; THEIVEYANATHAN, S. Effluent irrigated plantations: design and management. CSIRO. Division of Forestry. Technical Paper No. 2. Australia: CSIRO, 1995.

NCASI. The land application of wastewater in the forest products industry. 459, New York, N.Y.: National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement INC., 1985.

NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R. F; ANJOS, J. L. Efeito do alumínio em amostras de dois latossolos sob cerrado sobre o crescimento e a absorção de nutrientes de mudas de *Eucalyptus* spp. Revista Árvore, v.6, p. 17-20. 1982.

NUTTER, W. L.; RED, J. T. Treatment of wastewater by application to forest land. TAPPI Journal, n. 68, p. 114-117. 1985.

Organización Mundial de la Salud. Diretrizes sanitarias sobre el uso de aguas residuales en agricultura y acuicultura. Ginebra: OMS, 1989. 90p. (série Informes Técnicos, 78).

OVERCASH, M. R.; PAL, D. Design of land treatment systems for in-

dustrial wastes – theory and practice. Ann Arbor, Mich.: Ann Arbor Science Publishers Inc., 1979.

REZENDE, A.A.P. Fertirrigação do eucalipto com efluente tratado de fábrica de celulose kraft branqueada. Viçosa: UFV, 2003. 160p.

Rowe, D. R.; Abdel-Magid, I. M. Handbook for Wastewater Reclamation and Reuse. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc., 1995.

SANDRI, D. et al. Efeito do uso de água residuária em sistemas de irrigação por gotejamento superficial e subterrâneo. In: XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, CONBEA, Foz do Iguaçu. Anais ... Foz do Iguaçu: CONBEA, 2001.

SANEPAR. COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ. Manual técnico para a utilização agrícola do lodo de esgoto do Paraná. Curitiba: SANEPAR, 1997. 96p.

Sanks, R. L.; Asano, T. Land treatment and disposal of municipal and industrial wastewater. Ann Arbor, Michigan: Ann Arbor Science Publishers Inc., 1976.

SIMON, Z.; TEDESCO, M.J. Uma abordagem ampla sobre tratamento de resíduos semilíquidos em solos agrícolas – discussão sobre critérios de controle ambiental. In: 17º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1993, Natal. Anais... Natal: ABES, 1993.

Smith, C. T. et al. Land application of CTMP effluent in New Zealand: from research to practice. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL FATE AND EFFECTS OF PULP AND PAPER MILL EFFLUENTS, Rotorua. Proceedings... Rotorua, New Zealand: CSIRO, 1997.

SZIKSZAY, M. Geoquímica das

águas. São Paulo: Boletim IG n.5. 1993.

Thacker, W. E. Silvicultural land application of wastewater and sludge from the pulp and paper industry. In: The Forest Alternative for Treatment and Utilization of Municipal Wastes, Washington D.C.: University of Washington Press, 1985b. p. 41-54.

UNEP. Environmental management in the pulp and paper industry. Technical Report n. 34. France: United Nations Environment Program, Industry & Environment Office, 1996.

URIE, D.H. The status of wastewater irrigation of forests, 1985. In: The forest alternative for treatment and utilization of municipal and industrial wastes. Washington : University of Washington Press, 1986. p. 26-40.

U.S.EPA. Process design manual for land treatment of municipal wastewater. EPA 625/1-81-013, U.S. Cincinnati, OH.: Environmental Protection Agency, Technology Transfer, 1981.

U.S.EPA. Guidelines for water reuse. U.S. Environmental Protection Agency. Thechnical Report No. EPA/625/R-92/004. Washington, DC: USEPA, 1992.

Vasconcelos, E.; Cabral. Use and environmental implications of pulp mill sludge as an organic fertilizer. Environmental Pollution, v.80, n.1, p.159-162. 1993.

VIEIRA, D.B. As técnicas de irrigação. 2 ed. São Paulo: Globo, 1995. 263p.

Vieira, R. F.; Ramos, M. M. Fertirrigação. In: RIBEIRO, A. et al. (Ed.) Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais- 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais – CFSEMG, 1999. p. 111-130.

Westenhouse, R. Irrigation disposal of wastes. TAPPI, v.46, n. 8, p.160A. 1960.

