

AVALIAÇÃO DA LIXIVIAÇÃO DE ÍONS EM COLUNAS DE SOLO UTILIZANDO ESGOTO TRATADO PARA FINS DE IRRIGAÇÃO

EVALUATION OF ION LEACHING IN SOIL COLUMNS USING TREATED WASTEWATER FOR IRRIGATION PURPOSES

EVALUACIÓN DE LA LIXIVIACIÓN DE IONES EN COLUMNAS DE SUELO UTILIZANDO AGUAS RESIDUALES TRATADAS PARA RIEGO

Rafaela Dantas de Lucena Rocha¹, Ana Paula Alves Feitosa de Amorim², Thamires Carolayne Cavalcanti Moura³, Ilka Djanira Ferreira do Nascimento⁴, Maria Cristiane Neves de Carvalho⁵

DOI: 10.54899/dcs.v22i85.3869

Recibido: 24/11/2025 | Aceptado: 26/11/2025 | Publicación en línea: 04/12/2025.

RESUMO

O reuso de efluentes domésticos tratados na agricultura tem se destacado como alternativa estratégica para regiões sujeitas à escassez hídrica, permitindo a ampliação da disponibilidade de água e o aporte de nutrientes essenciais ao solo. No entanto, seu uso requer atenção quanto à presença de microrganismos patogênicos, sais, metais pesados e compostos potencialmente tóxicos, que podem comprometer tanto a qualidade do solo quanto a segurança ambiental. A dinâmica dos solutos no ambiente edáfico depende de fatores como textura, matéria orgânica, pH, capacidade de troca de cátions e características físico-químicas do efluente, influenciando diretamente processos de adsorção, mobilidade e lixiviação. Nitrogênio e fósforo, por exemplo, apresentam comportamentos diferenciados: enquanto o nitrato tende à alta mobilidade e risco de contaminação de águas subterrâneas, o fósforo apresenta menor deslocamento vertical, mas pode acumular-se em superfície e ser transportado sob condições específicas. Nesse contexto, técnicas laboratoriais como colunas de solo representam ferramentas eficazes para avaliar, de forma controlada, o transporte de íons e seus efeitos sobre a estrutura e fertilidade do solo, permitindo simular condições reais de percolação. Assim, o presente estudo tem como objetivo analisar o comportamento da mobilidade e lixiviação de íons presentes em efluente proveniente de lagoa de maturação, empregando colunas de solo. Buscando gerar subsídios técnicos para o manejo seguro da fertirrigação com efluentes tratados, contribuindo para a sustentabilidade agrícola, redução de impactos ambientais e uso racional dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Fertirrigação. Mobilidade de Íons. Escassez Hídrica. Fertilidade do Solo.

¹ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: rafadantas_lucena@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0673-1579>

² Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: ana.afeitosa@ufpe.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-0283-3466>

³ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: tccmoura@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-4762-3849>

⁴ Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais, Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP), Caruaru, Pernambuco, Brasil. E-mail: ilkadjanira@hotmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5575-7578>

⁵ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, Brasil. E-mail: engenheiramariacristiane@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9350-742X>

ABSTRACT

The reuse of treated domestic wastewater in agriculture has emerged as a strategic alternative for regions subject to water scarcity, allowing for increased water availability and the supply of essential nutrients to the soil. However, its use requires attention to the presence of pathogenic microorganisms, salts, heavy metals, and potentially toxic compounds, which can compromise both soil quality and environmental safety. The dynamics of solutes in the soil environment depend on factors such as texture, organic matter, pH, cation exchange capacity, and physicochemical characteristics of the effluent, directly influencing adsorption, mobility, and leaching processes. Nitrogen and phosphorus, for example, exhibit different behaviors: while nitrate tends towards high mobility and risk of groundwater contamination, phosphorus shows less vertical displacement but can accumulate on the surface and be transported under specific conditions. In this context, laboratory techniques such as soil columns represent effective tools for evaluating, in a controlled manner, the transport of ions and their effects on soil structure and fertility, allowing the simulation of real percolation conditions. Thus, the present study aims to analyze the mobility and leaching behavior of ions present in effluent from a maturation pond, using soil columns. This seeks to generate technical support for the safe management of fertigation with treated effluents, contributing to agricultural sustainability, reduction of environmental impacts, and rational use of water resources.

Keywords: Fertigation. Ion Mobility. Water Scarcity. Soil Fertility.

RESUMEN

La reutilización de aguas residuales domésticas tratadas en la agricultura se ha convertido en una alternativa estratégica para las regiones con escasez de agua, permitiendo una mayor disponibilidad de agua y el aporte de nutrientes esenciales al suelo. Sin embargo, su uso requiere atención a la presencia de microorganismos patógenos, sales, metales pesados y compuestos potencialmente tóxicos, que pueden comprometer tanto la calidad del suelo como la seguridad ambiental. La dinámica de los solutos en el entorno edáfico depende de factores como la textura, la materia orgánica, el pH, la capacidad de intercambio catiónico y las características fisicoquímicas del efluente, lo que influye directamente en los procesos de adsorción, movilidad y lixiviación. El nitrógeno y el fósforo, por ejemplo, presentan comportamientos diferentes: mientras que el nitrato tiende a una alta movilidad y al riesgo de contaminación de las aguas subterráneas, el fósforo muestra un menor desplazamiento vertical, pero puede acumularse en la superficie y ser transportado en condiciones específicas. En este contexto, las técnicas de laboratorio como las columnas de suelo representan herramientas eficaces para evaluar, de forma controlada, el transporte de iones y sus efectos sobre la estructura y la fertilidad del suelo, permitiendo la simulación de condiciones reales de percolación. Por lo tanto, el presente estudio busca analizar la movilidad y el comportamiento de lixiviación de los iones presentes en el efluente de una laguna de maduración, utilizando columnas de suelo. Esto busca generar apoyo técnico para la gestión segura de la fertirrigación con efluentes tratados, contribuyendo así a la sostenibilidad agrícola, la reducción del impacto ambiental y el uso racional de los recursos hídricos.

Palabras clave: Fertirrigación. Movilidad Iónica. Escasez Hídrica. Fertilidad del Suelo.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

O reuso do esgoto tratado pode ser uma fonte alternativa de água, matéria orgânica e nutrientes, com possibilidades de assegurar e incrementar a produção agrícola durante as estiagens prolongadas, em especial ao nível da agricultura familiar, contribuindo para a fixação do homem no campo (Lima, 2012). Porém, existem outros pontos a serem considerados no reuso de águas residuais domésticas tratadas na agricultura, como por exemplo, a presença de patógenos e de metais pesados nessas águas, o que pode provocar problemas nutricionais e de contaminação. Assim, antes de realizar a aplicação das águas residuais tratadas ao solo, é necessário realizar um estudo prévio e ver a sustentabilidade econômica e ambiental do reuso agrícola de desses resíduos (Pires, 2018)

Neste contexto, os fatores que justificam o uso desses efluentes em fertirrigação são a conservação da água disponível, a presença de matéria orgânica, possibilidade do aporte de nutrientes, além da preservação do meio ambiente (dos Santos *et al.*, 2010). Assim, a utilização agrícola dos efluentes domésticos tratados surge como alternativa para seu descarte, com o benefício da reciclagem de nutrientes para as culturas (Cavallet *et al.* 2006).

Por outro lado, a assimilação de matéria orgânica e nutrientes podem causar impactos ambientais negativos, sendo necessário verificar o comportamento dos íons no solo, a fim de evitar problemas estruturais e toxicidade às plantas. Segundo Costa (2002), compreender a distribuição da água e do soluto nas diversas profundidades do solo é de suma importância para prevenir o desequilíbrio de nutrientes no solo, evitando a contaminação de lençóis freáticos e a desestruturação do solo.

O movimento de solutos do solo depende de fatores relacionados às propriedades do meio poroso e suas interações, às propriedades do líquido percolante e às condições ambientais que influenciam os parâmetros de transporte dos solutos (da Silva *et al.* 2012). Assim, para possibilitar o manejo adequado da fertirrigação com efluentes domésticos tratados, o conhecimento da mobilidade dos íons presentes nos efluentes no solo é de suma importância para o desenvolvimento das culturas e o equilíbrio químico e estrutural do solo.

Nesse aspecto, o uso de colunas de solo em laboratório, com amostras deformadas ou indeformadas, compõe uma técnica viável e útil para monitorar o deslocamento de compostos

no perfil do solo e estimar os parâmetros de transporte de solutos no solo (Silva, 2013).

A importância do estudo do transporte de solutos no solo reside no fato de que, a partir do conhecimento das propriedades e das interações de determinada substância química com o meio e de sua movimentação e persistência no solo, é possível prever os riscos de contaminação e os impactos que ela pode causar ao meio ambiente.

REFERENCIAL TEÓRICO

Alternativa de Reuso do Efluente Doméstico Tratado

O desenvolvimento agrícola exige novas estratégias no sentido de potencializar a produtividade e minimizar os riscos na produção. Com o aumento da população mundial, a produção de alimentos com base apenas na estação chuvosa não é suficiente. Um dos importantes desafios da agricultura atual é os aumentos da competitividade e da qualidade dos produtos, associados à preservação dos recursos hídricos e do meio ambiente, permitindo benefícios sustentáveis nas explorações agrícolas. Neste contexto, é importante avaliar e adequar cada um dos fatores que compõem o sistema de produção, incluindo a eficiência e o manejo da água de irrigação (Dantas *et al.*, 2014).

A irrigação tem sido considerada como a atividade humana com a maior demanda por água, em função do aumento e da evolução tecnológica ocorrida em meados do século passado, podendo chegar à ordem de 80% em relação ao total da demanda hídrica mundial (DantaS *et al.*, 2014).. Nos últimos anos, vem ocorrendo um aumento da utilização de águas residuais para irrigação de culturas agrícolas, tanto em países desenvolvidos quanto em países industrializados.

Segundo WHO (2006), as principais forças que têm impulsionado o aumento do uso de águas residuais são: os aumentos da escassez de água e do estresse hídrico, além da degradação dos recursos hídricos, resultado da disposição inadequada de efluentes *in natura* ou não tratados adequadamente; o crescimento da população e, consequente, o aumento da demanda por alimentos; o reconhecimento crescente do valor das águas residuais e dos nutrientes que contêm; os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio, principalmente aqueles que visam à garantia da sustentabilidade ambiental e a eliminação da pobreza e da fome, traçados pela ONU (Organização das Nações Unidas).

O uso de águas residuais para fins agrícolas é uma prática antiga. No entanto, cabe

ressaltar que a qualidade da água a ser utilizada na irrigação é importante tanto para a saúde dos agricultores, os quais vão entrar em contato com esse resíduo, quanto para os consumidores dos alimentos irrigados com a “água de reuso”. Nas regiões áridas e semiáridas, a água se tornou um fator limitante para o desenvolvimento urbano, industrial e agrícola. Planejadores e entidades gestoras de recursos hídricos procuram, continuamente, novas fontes de recursos para complementar à pequena disponibilidade hídrica ainda disponível.

O desenvolvimento agrícola exige novas estratégias, no sentido de potencializar a produtividade e minimizar os riscos na produção. Com o aumento da população mundial, a produção de alimentos com base apenas na estação chuvosa não é suficiente. Um dos importantes desafios da agricultura atual é o aumento da competitividade e qualidade dos produtos, associado à preservação dos recursos hídricos e do meio ambiente, permitindo benefícios sustentáveis nas explorações agrícolas. Neste contexto, é importante avaliar e adequar cada um dos fatores que compõem o sistema de produção, incluindo a eficiência e o manejo da água de irrigação.

No Brasil, o crescimento urbano e industrial tem causado, dentre outros problemas ambientais, a poluição dos cursos de água pela eliminação de esgotos não-tratados. Assim, é preocupante a contaminação das águas superficiais por resíduos produzidos nos diversos segmentos das atividades humanas, tornando-se necessário o desenvolvimento de tecnologias que reduzam a produção desses resíduos e busquem formas de utilizar e ou transformá-los, sem promover mais passivos ambientais (Figueiredo, 2010).

As águas utilizadas na irrigação são cada vez mais escassas e de pior qualidade no mundo. Essa realidade demanda uma busca por técnicas de adaptação dos métodos de irrigação existentes e amplamente difundidos às condições atuais e futuras de escassez de água. Diante desse panorama, é clara a necessidade de se utilizar esse recurso natural com maior racionalidade, seja através de formas que permitam um aproveitamento mais eficiente da água em diversas atividades humanas, como a busca por fontes alternativas de água para irrigação (Duarte, 2006).

A escassez de recursos hídricos e o aumento dos conflitos pelo uso da água geraram a emergência da conservação e do tratamento e reuso desses, como componentes formais da gestão de recursos hídricos. Os benefícios inerentes à utilização de água recuperada para usos benéficos, ao contrário de disposição ou descarga, incluem preservação de fontes de qualidade elevada, proteção ambiental e benefícios econômicos e sociais (Lima *et al.*, 2012).

Qualquer que seja a forma de reuso empregada, é fundamental observar que os princípios básicos que devem orientar essa prática são: preservação da saúde dos usuários, preservação do

meio ambiente, atendimento consistente às exigências de qualidade relacionadas ao uso pretendido e proteção dos materiais e equipamentos utilizados nos sistemas de reuso (Lima *et al.*, 2012)

Adequação de Efluente Tratado para Agricultura

A composição média do esgoto aponta para uma mistura de água (99,9%) e sólidos (0,1%), sendo que, do total de sólidos, 70% são orgânicos (proteínas, carboidratos, gorduras) e 30% inorgânicos (partículas minerais, sais e metais). Durante o processo de tratamento, ocorre a separação das frações sólida e líquida. O tratamento de esgotos resulta na produção de um lodo rico em nutrientes e matéria orgânica, denominado lodo de esgoto (Almeida, 2010).

Os esgotos apresentam microrganismos patogênicos tais como, fungos, bactérias e vírus que podem causar enfermidades agudas ou crônicas. Dentre as enfermidades agudas, predominam as doenças infecciosas diarreicas, hepáticas e respiratórias. As crônicas são representadas principalmente pela asma brônquica e pela alveolite alérgica. A presença e os níveis de patógenos no esgoto dependem, naturalmente, dos níveis de infecção da população contribuinte, ou seja, da população assistida pela rede de esgoto (Almeida, 2010).

O processo convencional de tratamento de esgotos produz sólidos durante a sedimentação primária e no tratamento biológico. Esses sólidos contêm vários produtos orgânicos e inorgânicos tais como a biomassa produzida pela conversão biológica de compostos orgânicos, escumas, óleos e graxas, nutrientes (N e P), metais pesados, compostos orgânicos sintéticos, patógenos, etc. Os sólidos são posteriormente estabilizados para reduzir a matéria orgânica, eliminar odores ofensivos e baixar o nível de patógenos (Hong *et al.* 2003).

Pode-se, então, separar o tratamento de esgoto domiciliar em 4 níveis básicos: preliminar, primário, secundário, terciário ou pós-tratamento. Cada um deles têm, respectivamente, o objetivo de remover sólidos suspensos (lixo, partículas minerais) e sólidos dissolvidos, matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos.

Os esgotos domésticos têm composição complexa, a qual varia de acordo com os hábitos da população e oferta de água pelo sistema de abastecimento, como por exemplo: compostos orgânicos de cadeia longa; carboidratos; proteínas; lipídeos; aminoácidos; metais; bactérias; vírus e protozoários. Com vistas à utilização dos esgotos tratados na agricultura, é importante que seja promovida a remoção da maior parcela da matéria orgânica (estabilização), para evitar a

proliferação de maus odores e vetores transmissores de doenças, e de microrganismos patogênicos (Silva, 2009)

Lagoas de estabilização, por exemplo, são adequadas para países em desenvolvimento, pois demandam por áreas consideráveis, praticamente não demandam energia elétrica e não requerem equipamentos eletromecânicos sofisticados, baixa produção de sólidos, quando comparada com os sistemas aeróbios de tratamento de esgotos. Cabe referir que o efluente final, tratado por esse processo de tratamento, é rico em fósforo (P) e nitrogênio (N), e que em períodos de verão carregam grandes concentrações de algas. Na saída das lagoas podem ser adotadas instalações para remoção parcial das algas no efluente final (Gehling, 2017).

O tratamento por lagoas anaeróbias também é favorecido pelas condições ambientais do Brasil, que o torna ainda mais atrativo, especialmente na região Nordeste, onde as temperaturas atingem valores próximos a 30°C, durante quase todo o ano. As altas temperaturas estimulam a atividade dos microrganismos responsáveis pela remoção da matéria orgânica (Silva, 2009).

Após as lagoas de estabilização, as lagoas de maturação são geralmente usadas como unidade de polimento do efluente. Através de processos naturais e eficientes de redução de organismos patogênicos, as lagoas de maturação são os únicos sistemas capazes de produzir efluente com qualidade adequada para o reuso em irrigação irrestrita, sem a necessidade de uma etapa adicional de desinfecção (Sampaio e Mendonça, 2006). O tratamento terciário é normalmente empregado para reduzir o teor de nutrientes e o NMP (número mais provável) de coliformes termotolerantes. Quanto à redução de coliformes, a eficiência das lagoas terciárias é comparável à da cloração.

A real efetividade das lagoas de maturação na remoção de organismos patogênicos é convenientemente avaliada através do decaimento dos coliformes fecais (CF). Este tipo de lagoa possui baixa profundidade (em torno de 1,5m) devido à necessidade de incidência da radiação ultravioleta sobre a mesma para eliminar patógenos, e desta forma favorecer a produtividade de algas e consequentemente de altíssimas concentrações de oxigênio (Lima *et al.*, 2012)

Estudos de Maynard *et al.* (1999), falam da importância do tratamento de esgotos sanitários em lagoas terciárias para o reuso do efluente tratado na irrigação, já que este possui uma satisfatória remoção de patógenos. Para esses autores, entre os parâmetros físico-químicos estudados em lagoas terciárias para verificar a remoção de microrganismos patogênicos, o pH, a concentração de oxigênio dissolvido, a luminosidade e a profundidade possuem uma grande importância.

Diretrizes Técnicas para o Uso do Efluente Tratado

As lagoas de estabilização são bem aceitas quando se trata da remoção de agentes microbiológicos, dentre outros parâmetros, sendo considerada uma das principais formas de tratamento de águas residuais para fins agrícolas, sendo reconhecida pela OMS como uma das melhores formas de tratamento para reuso de água com a finalidade de irrigação de culturas agrícolas. Além disso, essas lagoas têm a vantagem, em relação ao tratamento convencional, de serem econômicas e de fácil operação e manutenção, por ter baixo custo financeiro, são apontadas como alternativas de tratamento e de reuso de água para países em desenvolvimento (WHO, 2006).

As diretrizes estabelecidas têm a finalidade de proporcionar informação e orientação a autoridades governamentais, para, assim, auxiliar nas tomadas de decisões relativas à proteção da saúde pública e do meio ambiente. A OMS faz algumas recomendações em relação ao uso das águas residuais para fins agrícolas, destacando a importância da qualidade biológica dos efluentes utilizados na irrigação, com a finalidade de diminuir as probabilidades de propagação de patógenos, evitando diferentes doenças. Diversas formas de tratamento de efluentes são utilizadas para que atinjam o enquadramento de qualidade indicado pela OMS (WHO, 2006).

Além dos parâmetros biológicos, os parâmetros químicos também devem ser considerados quando se trata de utilização de água residual para irrigação. Diversos parâmetros químicos são de extrema importância para a agricultura, tendo papel fundamental na produtividade, qualidade das culturas, manutenção da capacidade produtiva do solo e proteção do meio ambiente e da saúde dos consumidores finais, sendo eles, principalmente, os sólidos dissolvidos totais, condutividade elétrica, adsorção de sódio, íons específicos, elementos traço e metais pesados (Lima *et al.*, 2012)

De acordo com (Embrapa, 2010), o conjunto de parâmetros a serem considerados na avaliação de qualidade de água para a irrigação deve contemplar o conjunto de características físicas, químicas e biológicas que definem sua adequação ou não para o uso. O cuidado com qualidade da água de irrigação reflete nos desempenhos das culturas que a receberão. Na Tabela 1 estão descritos os intervalos desejáveis dos parâmetros das águas de irrigação.

Tabela 1

Intervalos dos parâmetros nas águas de irrigação

Parâmetros	Unidade	Quantidade
Condutividade Elétrica	dS.m ⁻¹	0 - 3,00
Sais Totais Dissolvidos	mg L ⁻¹	0 – 2000,00
Cálcio		0 - 400,08
Magnésio		0 - 60,80
Sódio		0 - 919,60
Carbonatos		0 – 3,00
Sulfatos		0 - 960,60
Nitrogênio-Amoniacal		0 – 5,00
Nitrogênio-Nitrato		0 – 10,00
Fósforo		0 – 2,00
pH	-	6 - 8,50
Razão de adsorção de sódio	(nmol _c L ⁻¹) ^{1/2}	0 – 15,00

Fonte: Embrapa, 2010.

No Brasil, não existem normas e padrões técnicos específicos para regulamentar e direcionar, a nível nacional, o reuso de águas residuais, provavelmente devido à falta de tradição quanto à aplicação desta prática.

No entanto, a NBR 13.969 (1997) trata de providências e cuidados, além de fornecer instruções a respeito do esgoto de origem doméstica. Tal norma foi elaborada com o objetivo de oferecer alternativas técnicas mais viáveis para proceder ao tratamento complementar e disposição final do efluente de usuários do sistema local de tratamento de esgotos, o qual possui tanque séptico como unidade preliminar. Sendo assim, a norma veio como uma alternativa paralela ao sistema convencional de saneamento, visando contribuir para a evolução do saneamento básico e a proteção ao meio ambiente. A norma também cita que esse efluente pode ser reutilizado para fins, em que não se exija o uso de água potável, desde que seja sanitariamente seguro, como por exemplo, lavagem de pisos e veículos, descarga de vasos sanitários e irrigação de jardins (ABNT, 1997).

Outras Normas Técnicas, a nível estadual, também estabelecem diretrizes para a correta reutilização de efluentes tratados, a exemplo da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), que publicou a Norma CETESB P4.231, de dezembro de 2006, com o objetivo de estabelecer critérios e procedimentos para o armazenamento, transporte e aplicação da vinhaça gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana-de-açúcar, no solo do Estado de São Paulo. Para o estabelecimento desta norma, considerou-se a necessidade de disciplinar os procedimentos, a fim de se evitar a ocorrência de poluição (Cetesb, 2006).

Já a Norma CETESB P04.002, de maio de 2010, tem como objetivo estabelecer os

critérios e procedimentos para armazenamento, transporte e aplicação, em solo agrícola, de efluentes líquidos e lodos fluidos gerados pela atividade de processamento de frutas cítricas no Estado de São Paulo, de forma a minimizar o risco de poluição do solo e das águas superficiais e subterrâneas (Cetesb, 2010).

Processo de Interação dos Metais no Solo

O solo é um meio complexo e heterogêneo, no qual coexistem e interagem os três estados da matéria: sólido, líquido e gasoso. A fase sólida é constituída por substâncias minerais e orgânicas; a fase líquida se refere à água onde se encontram dissolvidos, em quantidades e espécies variáveis com a composição que o solo apresenta num determinado momento, elementos minerais e compostos orgânicos, e, por último, a fase gasosa, que corresponde ao ar e aos gases produzidos no próprio solo. Portanto, o solo é um sistema complexo que compreende uma variedade de micro habitats com diferentes gradientes físicos e químicos, e condições ambientais descontínuas (Cavinatto e Paganini, 2007).

As alterações nas características do solo, em consequência da fertirrigação com efluentes tratados, podem manifestar-se através de aspectos físicos, químicos e bióticos. As alterações físicas são menos frequentes, mas podem acarretar fenômenos irreversíveis ou dificilmente reversíveis, como por exemplo, a dispersão dos coloides, que é provocada pelo excesso de sódio (Na^+) no solo.

O pH do solo é uma determinação da concentração de íons H^+ na solução do solo, e influencia a disponibilidade de nutrientes. (Embrapa 2017). O aumento do pH está relacionado diretamente às quantidades de íons H^+ dos pontos, ou sítios de troca, das superfícies da argila.

Os nutrientes minerais são adquiridos primariamente na forma de íons inorgânicos e entram na biosfera predominantemente através do sistema radicular da planta. A grande área superficial das raízes e sua grande capacidade para absorver íons inorgânicos em baixas concentrações na solução do solo, tornam a absorção mineral pela planta um processo bastante efetivo. Além disso, outros organismos, como os fungos (micorrízicos) e as bactérias fixadoras de nitrogênio, frequentemente contribuem para a aquisição de nutrientes pelas plantas. Depois de absorvido, os íons são transportados para as diversas partes da planta, onde são assimilados e utilizados em importantes funções biológicas.

A absorção de água e de íons minerais ocorre, predominantemente, através do sistema

radicular, o qual está inserido em um meio heterogêneo e cambiante (notadamente nos seus aspectos químicos), o solo. Isto implica que a raiz além de se desenvolver dentro do solo, deve ter mecanismos que permitam selecionar os nutrientes que a planta necessita para o seu crescimento. A membrana celular representa a barreira, por onde a planta pode controlar a entrada e saída de diversos solutos. Em geral, o transporte é altamente seletivo, ou seja, a membrana tem preferência por alguns íons e esta preferência é determinada pelas proteínas de transporte na membrana

O solo é um substrato complexo em termos físicos, químicos e biológicos. As partículas inorgânicas da fase sólida providenciam o reservatório de nutrientes, tais como K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , dentre outros. Também associadas à fase sólida do solo estão as partículas orgânicas (oriundas da decomposição de restos orgânicos), as quais contêm elementos essenciais, como N, P, S, por exemplo. A fase líquida do solo constitui a solução do solo, a qual contém íons dissolvidos e serve como meio para o movimento de íons para a superfície das raízes. Os gases, tais como O_2 , CO_2 e N_2 , estão dissolvidos na solução do solo, porém, sua absorção pelas raízes ocorre predominantemente nas bolhas de ar entre as partículas do solo.

As partículas coloidais (micelas) do solo, orgânicas (pectinas com COO^- e hemiceluloses com OH^-) e inorgânicas (caolinita, smectita e ilita) têm cargas negativas na sua superfície; assim, os cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , por exemplo, ficam adsorvidos às cargas negativas das partículas do solo. Nessa situação, eles não são facilmente perdidos por lixiviação e representam uma reserva de nutrientes à planta. Esses íons podem ser substituídos no complexo de troca, um processo conhecido como troca de cátions. A capacidade de troca de cátions (CTC) é altamente dependente do tipo de solo. Solos com partículas menores (argila) têm uma maior superfície específica (relação área superficial/volume). Esses solos, e também os solos ricos em matéria orgânica, possuem maior superfície de cargas expostas e, portanto, maior CTC. Um solo que tem alta CTC possui maior reserva de nutrientes minerais. A fertilidade desse solo será completa se a maior CTC for devida a elevada percentagem de saturação de bases (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+). A presença de elementos tóxicos, como alumínio (Al^{3+}), pode acarretar em problemas para o crescimento das plantas.

Ânions como NO_3^- e Cl^- são repelidos pelas cargas negativas das partículas do solo e permanecem dissolvidos na solução do solo, ficando sujeitos à lixiviação. Já os fosfatos ($H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-}) podem permanecer fixados ao solo contendo Al^{3+} e Fe^{3+} , porque formam sais insolúveis, tais como $AlPO_4$ e $FePO_4$. O sulfato (SO_4^{2-}), na presença de Ca^{2+} forma o gesso

(CaSO₄), o que limita a mobilidade deste ânion no solo.

O mais importante efeito do efluente tratado nas propriedades físicas e hidráulicas do solo está relacionado à sua salinidade e sodicidade, as quais podem causar a diminuição da infiltração da água no solo. A redução na infiltração e na condutividade hidráulica é causada pelo bloqueio dos poros com partículas finas de argila, provocado pela sua dispersão (So e Aylmore, 1993). Essas condições podem resultar na redução das taxas de crescimento da planta, da produtividade e, em casos extremos, na perda do plantio. O problema é maior sob condições de clima quente e seco. A disposição de efluentes tratados com baixa salinidade, porém com alta PST (Porcentagem de Sódio Trocável, entre 10% a 15%), ou seja, com significativa predominância de íons sódio, pode promover a dissolução das partículas de argila, provocando a diminuição da permeabilidade do solo, a redução de sua aeração e a inibição do desenvolvimento do sistema radicular das plantas, com a consequente perda da produtividade (Embrapa, 2015).

Acúmulo de Nitrogênio e Fósforo no Solo

Os sistemas de uso de efluentes para fins agrícolas, adequadamente planejados e administrados, proporcionam melhorias ambientais e de condições de saúde, dentre as quais se destacam: conservação do solo, pela acumulação de húmus, e aumento da resistência à erosão e da concentração de matéria orgânica do solo, possibilitando maior retenção de água. Um efeito potencialmente negativo é a poluição, particularmente pelo N e P, de aquíferos subterrâneos.

Em geral, os solos apresentam diferenças em termos de pH, matéria orgânica, teor e tipo de argila. Isso implica em CTC (Capacidade de Troca de Cátions) e balanços de cargas diferenciados, além de possibilidades de conversão de amônio a nitrato e lixiviação desses dois íons a diferentes taxas. Além disso, essa disparidade na natureza dos solos implica também em capacidades distintas de mineralização da matéria orgânica; portanto, em diferentes taxas de lixiviação de N e P. Os resíduos orgânicos interagem com os solos dos seguintes modos: podem aumentar a CTC, alterar o pH e influenciar a taxa de mineralização da matéria orgânica do solo, com implicações sobre a lixiviação de íons. Além disso, os resíduos orgânicos possuem íons de N e P (Hargreaves *et al.*, 2008), logo, podem também resultar em maior lixiviação.

Huang *et al.* (2017), em experiência a longo prazo, demonstraram claramente um efeito positivo de incorporação de adubos no rendimento da colheita (absorção pelas plantas) e armazenamento total de N no solo, bem como a redução na perda de lixiviação. A perda

significativa de N por lixiviação foi menor quando usado um fertilizante orgânico. Os autores demonstraram que o benefício integrado da incorporação de fertilizantes orgânicos resultou em reduzida perda de N por lixiviação, resultando no acúmulo desse elemento no solo para absorção pela planta, proporcionando também menores riscos de poluição ao meio ambiente.

Perdas por lixiviação do NO_3^- contido no solo para a água não só reduz a fertilidade do solo, como também compromete o meio ambiente e a saúde humana, uma vez que grandes quantidades de NO_3^- ($> 5\text{mg.L}^{-1}$) nas águas superficiais causam sua eutrofização (afetando a fauna e flora aquática), e a ingestão de NO_3^- em excesso pelo homem causa metemoglobinemia e incidência de câncer de estômago (Cameron *et al.* 2013).

A matéria orgânica do solo, apresentou correlação com a produtividade de culturas e de estabilidade de produção (Pan, 2009). A aplicação combinada de fertilizante orgânico pode promover a imobilização de N para reduzir sua perda por lixiviação (Liu *et al.* 2009).

A forma pela qual o N é adicionado ao solo afeta sua distribuição espacial na superfície e no perfil. O amônio (NH_4^+), por exemplo, é geralmente mais adsorvido aos colóides do solo, que apresentam, predominantemente, cargas negativas, tendo, assim, mobilidade inferior em relação à do nitrato (NO_3^-). Entretanto, havendo condições propícias no meio, o NH_4^+ é rapidamente transformado em NO_3^- pelos microrganismos. Isso é preocupante, porque o NO_3^- , dependendo das características do solo, apresenta alta mobilidade, podendo ser lixiviado com maior facilidade e, conseqüentemente, vir a contaminar águas subterrâneas (Scicolone, 2014).

No caso do fosfato (PO_4^{2-}), sua mobilidade é pequena, comparativamente ao NO_3^- , portanto as perdas pela movimentação vertical em solos agricultáveis são consideradas insignificantes (Heathwaite *et al.*, 2010). Em quantidades que excedem à demanda da cultura, podem causar a movimentação de P no perfil do solo, devido à diminuição da capacidade de adsorção do solo, na medida em que as moléculas orgânicas, ou mesmo o fosfato de aplicações anteriores, ocupam os sítios de adsorção. Além disso, há possibilidade da movimentação de fósforo ligado à matéria orgânica solúvel no perfil do solo.

O escoamento superficial pode ser considerado uma forma importante de perdas de P, em comparação com a sua lixiviação; mas, estudos recentes indicaram que a lixiviação de solos é uma questão de interesse (Qin *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2015), indicando que a acumulação de P na superfície do solo pode intensificar risco de perdas do elemento e aumentar a circulação do mesmo abaixo da camada de arado. Muitos fatores como a saturação de P no solo e textura desse solo pode afetar a lixiviação, como também solos arenosos, solos que são mal drenados e ricos

em matéria orgânica afetam a lixiviação. (Jalali e Ostovarzadeh, 2009).

A perda de P por lixiviação está, de fato, associada às propriedades do solo (Liu *et al.*, 2012), e sobre o manejo do solo. A colocação de fertilizantes ricos em P pode aumentar sua concentração no solo, abaixo da superfície, resultando na rápida dessorção de P, a partir da matriz do solo, e aumentando a concentração de P no lixiviado. (Zheng *et al.*, 2014).

Pizzeghello *et al.* (2011) constatou que sob aplicações de P a longo prazo, fosfatos de cálcio tornam-se estáveis e grande quantidade de P pode acumular-se no solo, podendo prejudicar os lençóis subterrâneos, porque quando lixiviados para corpos d'água, causam a eutrofização desses, depreciando a biota aquática e o meio ambiente no qual está inserido.

Uso de Colunas de Colunas de Solo na Análise da Lixiviação

Atualmente, existe uma tendência em concentrar os estudos de adsorção e movimentação de poluentes no solo em laboratório, embora se reconheça que estudos de campo sejam indispensáveis ao monitoramento desses poluentes. Para o estudo da mobilidade de metais são utilizados ensaios laboratoriais de coluna e de equilíbrio em lote, que se destinam a medida dos parâmetros de transporte de espécies químicas em meios porosos.

A lixiviação como técnica para a extração dos elementos trocáveis do solo é largamente difundida em química, onde o material a ser estudado é colocado em um percolador, através do qual se passa um fluxo contínuo do solvente extrator, com um fluxo ideal que permita uma extração eficiente e que o solvente seja constantemente removido. Desse modo há uma lavagem instantânea, ininterrupta e completa das camadas sucessivas de amostra do solo. A maior ou menor extração dos íons em estado sorptivo, depende, naturalmente, de vários fatores (Alamino, 2010).

O ensaio em coluna tem por objetivo determinar os parâmetros de transporte que descrevem a migração de espécies químicas, ou contaminantes, através de um meio poroso, por exemplo, uma argila compactada, em condições controladas de laboratório. A partir da fusão das duas técnicas acima mencionadas, tem-se o Ensaio de Coluna de Lixiviação (ECL). Segundo Alamino, 2010, o ensaio de lixiviação em coluna se aproxima bastante da situação real e tem sido empregado por muitos pesquisadores no esclarecimento das inter-relações solo-contaminante para subsidiar projetos e obras de engenharia.

CONCLUSÃO

A literatura revisada permite concluir que o deslocamento de nutrientes e contaminantes no perfil do solo é um processo multifatorial, influenciado pela textura, pH, capacidade de troca de cátions, teor de matéria orgânica e composição química do efluente. A lixiviação pode ocorrer de maneira significativa para íons altamente móveis, como o nitrato, enquanto elementos como fósforo e cátions bivalentes tendem a ser retidos mais intensamente nas camadas superiores do solo, dependendo de suas interações com a matriz edáfica.

Os resultados oferecem subsídios técnicos que favorecem um uso mais seguro e eficiente de efluentes tratados na agricultura, promovendo conservação de água e melhoria da fertilidade do solo, especialmente em regiões afetadas pela escassez hídrica. Reforça ainda a importância de compreender os mecanismos de transporte de solutos em diferentes condições de solo, ampliando o conhecimento necessário para o desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis e para o aprimoramento de modelos preditivos de impacto ambiental.

A ausência de dados experimentais específicos para diferentes tipos de solo, a dependência de condições controladas de laboratório que não representam integralmente a complexidade dos ambientes agrícolas reais, e a variabilidade dos efluentes tratados, cuja composição pode mudar conforme a operação das lagoas de estabilização, limita a eficiência da pesquisa. Outro ponto limitante é que a análise em colunas, embora eficaz para estimativas iniciais, não substitui ensaios de campo que considerem fatores como clima, atividade microbiana e práticas agrícolas.

Diante disso, recomenda-se que pesquisas futuras incluam ensaios complementares em escala real, avaliem diferentes solos sob variados regimes de irrigação, investiguem o comportamento de íons específicos ao longo de ciclos sazonais e estudem a influência da matéria orgânica do efluente sobre a dinâmica do nitrogênio e do fósforo. Também se sugere o desenvolvimento de modelos que integrem dados laboratoriais e observações de campo, permitindo prever com maior precisão os riscos e benefícios associados ao uso de efluentes tratados na agricultura. Esses avanços poderão fortalecer a transição para sistemas produtivos mais sustentáveis e ambientalmente seguros.

REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). *NBR 13969: Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação*. http://www.acquasana.com.br/legislacao/nbr_13969.pdf
- Cameron, K. C., Di, H. J., & Moir, J. L. (2013). Nitrogen losses from the soil/plant system: A review. *Annals of Applied Biology*, 162, 145–173.
- Cavinatto, A. S., & Paganini, W. S. (2007). Os microrganismos nas atividades de disposição de esgotos no solo – estudo de caso. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 12(1), 42–51.
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2006). *Norma Técnica P4-231: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola*. http://www.cetesb.sp.gov.br/Tecnologia/camaras/P4_231.pdf
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2010). *Norma Técnica P4-002: Efluentes e lodos fluidos de indústrias cítricas – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola*. <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/servicos/normas/pdf/P4002.pdf>
- Dantas, I. L. A., Faccioli, G. G., Mendonça, L. C., Nunes, T. P., Viegas, P. R. A., & Santana, L. O. G. (2014). Viabilidade do uso de água residuária tratada na irrigação da cultura do rabanete (*Raphanus sativus* L.). *Revista Água e Ambiente*, 9(1).
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2010). *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais* (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento nº 1806-3322).
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2015). *Guia prático para interpretação de resultados de análises de solo* (Documento 206).
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2017). *Manual de métodos de análise de solo*.
- Figueiredo, P. (2010). Adubação orgânica e contaminação ambiental. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 5(3), 1–4.
- Gehling, G. (2017). *Lagoas de estabilização*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Hargreaves, J. C., Adl, M. S., & Warman, P. R. (2008). A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 123(1–3), 1–14.
- Heathwaite, L., Sharpley, A., & Gburek, W. (2000). A conceptual approach for integrating phosphorus and nitrogen management at watershed scales. *Journal of Environmental Quality*, 29(1), 158–166.

- Hong, S. M., Park, J. K., & Lee, Y. O. (2004). Mechanisms of microwave irradiation involved in the destruction of fecal coliforms from biosolids. *Water Research*, 38, 1–10.
- Huang, J., Duan, Y., Xu, M., Zhai, L., Zhang, X., Wang, B., & Zhang, Y. (2017). Nitrogen mobility, ammonia volatilization, and estimated leaching loss from long-term manure incorporation in red soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(9), 2082–2092.
- Jalali, M., & Naderi, E. (2012). The impact of acid rain on phosphorus leaching from a sandy loam calcareous soil of western Iran. *Environmental Earth Sciences*, 66, 311–317.
- Liu, M. Q., Hu, F., Chen, X. Y., & Jiao, J. (2012). Organic amendments with reduced chemical fertilizer promote soil microbial development and nutrient availability in a subtropical paddy field. *Applied Soil Ecology*, 42, 166–175.
- Maynard, H. E., Ouki, S. K., & Williams, S. C. (1999). Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms and performance. *Water Research*, 33(7).
- Pan, G., & Smith, P. (2009). The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129, 344–348.
- Pizzeghello, D., Berti, A., Nardi, S., & Morari, F. (2011). Phosphorus forms and P sorption in alkaline soils after long-term mineral and manure applications. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 141, 58–66.
- Qin, H. L., Quan, Z., Liu, X. L., Li, M. D., Zong, Y., Wu, J. S., & Wei, W. X. (2010). Phosphorus status and risk of phosphate leaching loss in vegetable soils of different planting years. *Agricultural Sciences in China*, 9, 1641–1649.
- Sampaio, L. F. S., & Mendonça, L. C. (2006). Desempenho de um sistema de lagoas de estabilização no tratamento de esgotos domésticos. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*.
- Scicolone, B. (2014). Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. *Agricultural Water Management*, 68(2), 135–149.
- Silva, A. S. (2012). *Influência da erosão na remoção de nutrientes e metais pesados em uma topossequência em Petrópolis (RJ)* (Tese de Doutorado). Instituto de Geologia, UFRJ.
- So, H. B., & Aylmore, L. A. G. (1993). How do sodic soils behave? The effects of sodicity on soil physical behaviour. *Australian Journal of Soil Research*, 31, 761–777.
- World Health Organization. (2006). *Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater: Vol. 2: Wastewater use in agriculture*. WHO.
- Zheng, Z. M., Zhang, T. Q., Wen, G., Kessel, C., Tan, C. S., O'Halloran, I. P., Reid, D. K., Nemeth, D., Speranzini, D., & Sharif, M. (2014). Soil testing to predict dissolved reactive phosphorus loss in surface runoff from organic soils. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 1786–1796.