

Avaliação legal e prática da aplicação de águas residuárias tratadas no solo no contexto do reúso de água no Brasil

Legal and practical assessment of the application of treated wastewater in the soil in the context of water reuse in Brazil

- **Data de entrada:**
06/07/2022
- **Data de aprovação:**
23/08/2022

Clara Bandeira de Carvalho¹ | Suetônio Mota¹ | Ana Sílvia Pereira Santos² |
André Bezerra Dos Santos^{1*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.045>

ORCID ID

Carvalho CB  <https://orcid.org/0000-0002-3418-3605>
Mota S  <https://orcid.org/0000-0001-6061-4539>

Santos ASP  <https://orcid.org/0000-0001-7823-9837>
Santos AB  <https://orcid.org/0000-0002-3395-8878>

Resumo

O reúso de água é considerado uma importante ferramenta de gestão hídrica. No entanto, apenas 4,9% da água utilizada no Brasil é reutilizada, a maior parte em atividades com risco de lançamento das águas residuárias tratadas (ART) no solo. Neste artigo foi feita uma análise de 6 legislações brasileiras regulamentadoras do uso de ART que apresentam valores para os padrões de reúso, assim como suas exigências para o monitoramento dos impactos no solo. Também foram analisados estudos de dispersão de poluentes no solo. Concluiu-se que, apesar de haver um avanço nas normas de reúso no país, é necessária a sua ampliação a fim de promover a disseminação dessa prática. Os valores de referência adotados pelas legislações são discrepantes e alguns são altamente restritivos e não condizentes com a realidade socioeconômica brasileira. Poucas normas indicam preocupação com a qualidade do solo quando há a disposição das ART e nenhuma especifica um método de avaliação da dispersão de poluentes no solo.

Palavras-chave: Padrão de qualidade. Contaminação do solo. Dispersão de poluentes. Esgoto sanitário. Irrigação. Agricultura.

Abstract

Water reuse is considered an important water management tool. However, in Brazil, only 4.9% of the water used is reused, most of it in activities with the risk of releasing treated wastewater (TWW) into the soil. In this article, an analysis was made of 6 Brazilian legislations that regulate the TWW use and that present values for reuse standards and their requirements for monitoring impacts on the soil. Studies on the dispersion of pollutants in the soil were also analyzed. It was concluded that besides the advance in reuse standards, an expansion is necessary to promote the dissemination of the practice in the country. The reference values adopted by the legislations are discrepant, and some are highly restrictive and inconsistent with the Brazilian socio-economic reality. Few legislations indicate a concern with soil quality when TWW is available, and none specify a method for evaluating the dispersion of pollutants in the soil.

Keywords: Quality standard. Soil contamination. Disposal of pollutants. Sanitary wastewater. Irrigation. Agriculture.

¹ Universidade Federal do Ceará (UFC) - Fortaleza - Ceará - Brasil.

² Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ) - Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brasil.

* **Autor correspondente:** andre23@ufc.br.

1 INTRODUÇÃO

A escassez de água é um fator cada vez mais preocupante, sendo considerada um dos maiores desafios para o desenvolvimento sustentável (SGROI, VAGLIADASHI e ROCCARO, 2018). Esse fenômeno pode ser caracterizado pelo aspecto quantitativo, ou seja, pela própria falta de água em si, fator influenciado pelo aumento populacional em perspectiva mundial, assim como pelo aumento nos padrões de consumo de água por aqueles que têm acesso (SGROI, VAGLIADASHI e ROCCARO, 2018; TORETTA et al., 2020). Adicionalmente, a preocupação pode ser avaliada pelo aspecto qualitativo, pela deterioração da qualidade dos recursos hídricos experimentada nas últimas décadas, o que está relacionado ao lançamento de águas residuárias sem tratamento e ao descarte inadequado de resíduos sólidos urbanos e industriais, fertilizantes, pesticidas, entre outros (TORETTA et al., 2020).

No Brasil, esse cenário se torna mais crítico devido à distribuição irregular dos recursos hídricos ao longo do território, o que leva ao estresse hídrico em algumas regiões. Em 2018, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) registrou 2.516 episódios de seca no país, o que afetou cerca de 43 milhões de pessoas, a maioria na região Nordeste (SANTOS e VIEIRA, 2020). Os usos de água mais relevantes estão associados à irrigação, abastecimento urbano e industrial, referentes a 50%, 25% e 10%, respectivamente, do volume total de água retirada das bacias hidrográficas do país em 2020, de um total de $1.947 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ (ANA, 2021).

De forma a buscar alternativas de uso racional da água, considerando ainda a redução dos impactos ambientais acarretados pela disposição inadequada de efluentes em corpos hídricos, o uso de águas residuárias tratadas (ART) surge como uma importante ferramenta de gestão hídrica. Neste caso, as ART são comumente aplicadas para fins não potáveis, como irrigação paisagística e agrícola, recarga de aquíferos, lavagens de ruas e veículos, entre

outros. Ressalta-se que até mesmo o uso potável (direto e indireto) vem ganhando destaque em todo o mundo, frente aos cenários cada vez mais graves de escassez hídrica (SANTOS et al., 2022).

Estima-se que apenas 50% das águas residuárias geradas no mundo sejam tratadas, das quais somente 11% são utilizadas (JONES et al., 2021). No Brasil, o reúso de água alcança valores absolutos de 50,5 bilhões de litros ao ano (ANA, 2021). Ressalta-se que embora sejam inúmeras as vantagens do reúso para a gestão integrada de recursos hídricos e saneamento, essa prática encontra barreiras para o seu desenvolvimento na rejeição psicológica natural dos usuários, nos riscos associados ao uso de ART e na falta de amparo legal que regule e dê segurança a sua aplicação (SANTOS et al., 2020). O demonstrativo atual do reúso de água em diferentes regiões do mundo é apresentado na Fig. 1.

De maneira geral, a segurança está relacionada à proteção da saúde pública e do meio ambiente (solo e águas subterrâneas), podendo ser garantida em função de padrões de qualidade de água que cientificamente comprovam esta relação. Porém, em nível nacional, ainda não há uma legislação com definição de padrões para a prática geral de reúso de água, embora recentemente tenha sido publicada a Resolução nº 503/2021 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA, 2021), para uso de algumas modalidades de efluentes industriais. Corroborando o cenário de falta de amparo legal, poucos estados brasileiros, como é o caso de Bahia, Ceará, São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, definiram padrões legais para a regulamentação da prática (SANTOS et al., 2020). Mais recentemente, a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA) publicou sua Resolução nº 5, de 09 de maio de 2022, que estabelece diretrizes para o aproveitamento ou reúso de água não potável em edificações no Distrito Federal (DISTRITO FEDERAL, 2022).

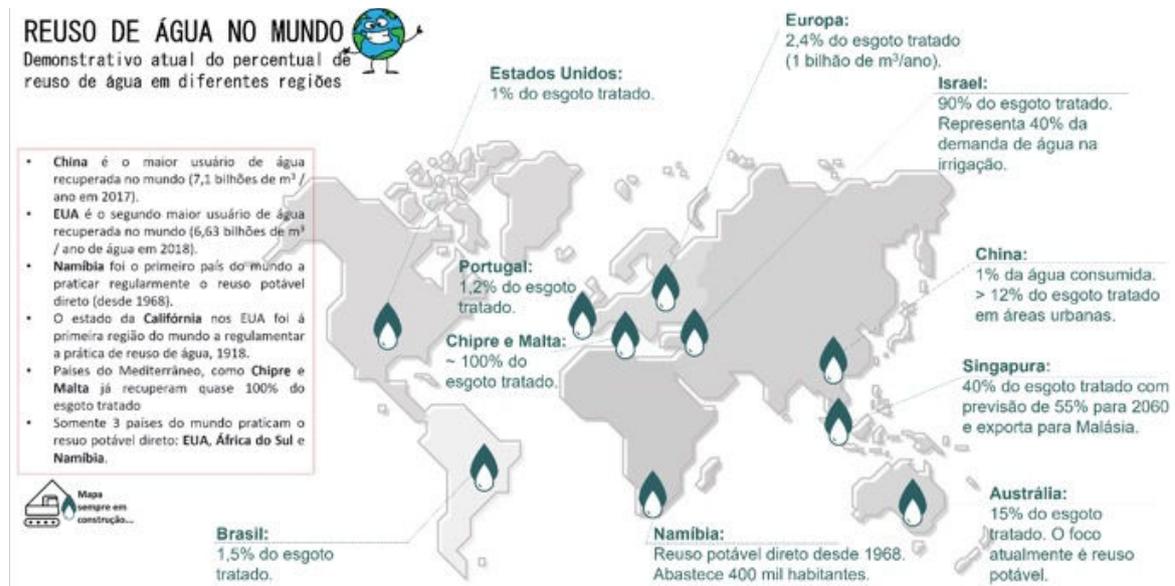


Figura 1 - Demonstrativo atual do reúso de água em diferentes regiões do mundo.

Fonte: RdA (2022).

1.1 Uso de águas residuais tratadas no Brasil

O uso de ART é uma importante ferramenta de gerenciamento hídrico que visa garantir a segurança em um cenário de aumento do consumo de água em todo o planeta, aliado à deterioração da qualidade dos corpos hídricos e às crises hídricas cada vez mais rígidas e frequentes (SGROI, VAGLIADASHI e ROCCARO, 2018). Esse uso pode ser definido como a recuperação de águas residuárias de modo a utilizá-las em atividades na cidade ou no campo, tendo como requisito a adequação da qualidade da água ao uso almejado, garantindo a segurança sanitária e ambiental (SANTOS et al., 2020).

Uma classificação para a prática do reúso pode ser em: reúso indireto não-planejado da água, reúso indireto planejado da água, reúso direto planejado das águas e reciclagem de água (CARVALHO, 2021). Outra maneira de classificar o uso de ART é em uso potável e não potável. A Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2005), estabeleceu modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não

potável de água, definindo as seguintes categorias: fins urbanos; fins agrícolas e florestais; fins ambientais; fins industriais; e aquicultura.

Em relação ao reúso de água para fins potáveis, o Brasil ainda não regulamentou a prática, uma vez que esta é associada a riscos de contaminação, devido à qualidade dos efluentes utilizados, que podem conter organismos patogênicos e contaminantes associados à origem do efluente, e compostos químicos que podem ser formados durante o tratamento ou que podem ser liberados do aquífero ou do sistema de distribuição (CARVALHO, 2021). Todavia, o lançamento das águas residuárias em corpos hídricos, por vezes até *in natura*, caracteriza o reúso potável indireto não planejado, quando há captação para abastecimento a jusante do lançamento, sem que haja tempo hábil para autodepuração e decaimento bacteriano.

O reúso potável indireto planejado é comum em várias regiões do mundo, embora o potável direto ainda esteja restrito a três países, atualmente: Namíbia, África do Sul e Estados Unidos (SANTOS et al., 2022). Todavia, o uso não potável de ART é consolidado em diversos países, por apresentar

riscos baixos, se comparado com a modalidade anterior. Essa prática é adotada para usos industriais, agrícolas, urbanos, entre outros (CARVALHO et al., 2021).

Carvalho (2021) aponta que o planejamento, a implantação e a operação de sistemas de uso de ART trazem uma série de benefícios, sendo comum a todas as modalidades a minimização das descargas de águas residuárias em corpos hídricos e a conservação do solo e dos recursos subterrâneos. A redução da pressão em corpos de água, o fornecimento em longo prazo de uma fonte segura de abastecimento de água para usuários que sofrem com a escassez e a minimização da necessidade de fertilizantes (pela reciclagem de nutrientes) também são vantagens importantes da prática (CARVALHO, 2021).

Ainda assim, para que a prática se desenvolva mais no Brasil, é necessário um árduo e constante trabalho de ampliação. A falta de incentivo por parte dos órgãos de gestão, a resistência dos usuários e a insuficiência de amparo normativo que forneça garantias técnicas e legais aos produtores e consumidores da ART podem ser causas do baixo índice brasileiro de 1,5% de ART utilizada em relação ao esgoto tratado no país (SANTOS e VIEIRA, 2020).

Conforme já mencionado, considerando documentos mandatórios legais que envolvam padrões de qualidade de água para as diferentes modalidades de reúso de água, o Brasil conta somente com a recém-publicada Resolução CONAMA nº 503/2021, e os documentos sub-federais dos estados da Bahia (2010), Ceará (2017), São Paulo (2017 com atualização em 2020), Minas Gerais (2020) e Rio Grande do Sul (2020), além do Distrito Federal (2022), embora este último seja para uso específico em edificações. Ainda, o programa INTERÁGUAS - Programa de Desenvolvimento do Setor Água, lançado em 2018, pelo governo federal, apresentou em seu Produto III,

diretrizes, padrões de qualidade de água e sugestões de tecnologias de tratamento de águas residuárias para alcance de qualidades compatíveis com as diversas modalidades de reúso de água nos setores público e privado do país (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2018). Porém, trata-se de um documento orientativo, sem força legal.

Ressalta-se que a Resolução CONAMA nº 503/2021 estabelece critérios para uso somente de efluentes industriais, provenientes do setor de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias, para fins de fertirrigação. Apesar de representar um avanço em termos nacionais, a resolução ainda é muito restrita no que diz respeito aos usos permitidos e à origem das águas residuárias, o que gera uma lacuna quanto a legislações que determinam padrões de qualidade para uso de ART no país.

Ainda, ao se abordar a preocupação com a contaminação do solo a partir da aplicação de ART, há que se destacar que a maioria dos documentos legais aqui mencionados não aborda este conteúdo, ou o incorporam aos padrões, de maneira indireta. No entanto, a contaminação do solo é uma consequência real, que pode trazer diversos agravos à qualidade da sua matriz, das águas subterrâneas e da produção agrícola da região que recebe esta aplicação.

1.2 Contaminação do solo a partir da aplicação de águas residuais tratadas

Muitos dos usos de ART envolvem o seu lançamento no solo, o que representa riscos de contaminação deste pelo acúmulo de compostos (a depender da qualidade da água residuária e da estrutura do solo), além de contaminação das águas subterrâneas pela lixiviação de solutos, alteração das características físico-químicas do solo e diminuição de sua fertilidade (ANDRADE et al., 2018; OFORI et al., 2021). Dessa forma, percebe-se a necessidade da avaliação do com-

portamento do solo ante a aplicação de ART, o que pode ser feito por meio de estudos de Modelagem da Dispersão de Contaminantes no Solo. Tradicionalmente, esse estudo completo deve ser iniciado com o levantamento dos parâmetros de transporte de cada contaminante, usualmente: coeficiente de dispersão (D), coeficiente de retardamento (R) e dispersividade (λ) do contaminante no solo.

Essa fase de levantamento dos parâmetros é experimental e trabalhosa; ainda, experimentos realizados com ART são escassos na literatura, mas imprescindíveis para o estudo de uso de ART (CARVALHO, 2021). Ademais, valores de D, R e λ são dados de entrada de *softwares* que utilizam fluidodinâmica computacional para modelar a pluma de contaminação. Nestes casos, as simulações são feitas a partir da variação da concentração do contaminante (CC) na ART, o tempo e a vazão de aplicação, com a finalidade de determinar a máxima CC possível na ART para evitar a contaminação de águas subterrâneas ou saturação do solo.

O presente trabalho, com o objetivo de realizar uma avaliação sobre os padrões de qualidade de água envolvidos com os aspectos legais e normativos atualmente em vigência no país para aplicação da prática de reúso de água, levou em consideração as questões relacionadas ao monitoramento do solo. Neste caso, avaliou-se a abordagem de controle de contaminação do solo nos documentos legais/normativos estudados, considerados como os existentes no território nacional relacionados à temática.

Dessa forma, nos próximos itens serão abordadas discussões sobre i) aspectos legais e seus respectivos padrões de qualidade de água; ii) monitoramento do solo para uso de águas residuárias

tratadas no Brasil; e iii) modelos para estudo da dispersão de poluentes no solo.

2 ASPECTOS LEGAIS E PADRÕES DE QUALIDADE DE ÁGUA

Nos estados brasileiros que desenvolveram legislações para regulamentar o uso de ART foram estabelecidos valores para os padrões de reúso, definidos de acordo com as diferentes modalidades de aplicação das ART. As categorias de uso das ART, assim como as especificações, podem ser encontradas na Tabela 1.

Vale destacar que a maioria das legislações aqui abordadas classifica os usos em categorias que envolvem, de maneira geral, graus de restrição. Usos nas categorias “limitado” ou “restrito” envolvem padrões de qualidade de água mais lenientes para a ART, na medida em que o acesso de usuários é controlado. De maneira oposta, categorias denominadas “amplo” ou “irrestrito” envolvem padrões mais restritivos, ao considerar um menor controle de acesso dos usuários. Para os casos de irrigação agrícola, o mesmo raciocínio pode ser adotado, porém considerando os tipos de culturas, as suas formas de consumo e crescimento, além dos métodos de irrigação. Por fim, o nível de restrição e a consequente qualidade da ART para as diferentes modalidades de reúso de água estão intimamente relacionados ao risco de contaminação.

Uma vez que as legislações que abordam o uso de ART dentro dos processos industriais afirmam que a qualidade da água é de responsabilidade do empreendedor (havendo exceção apenas para os usos que envolvam lançamento direto dentro do empreendimento), os usos industriais não foram abordados no presente trabalho.

Tabela 1 - Características gerais das categorias de uso de águas residuárias tratadas adotadas nas regulamentações abordadas.

Regulamentação	Modalidade	Características
Bahia (2010)	Reúso agrícola e florestal	<i>Categoria A:</i> irrigação, inclusive hidroponia, de qualquer cultura incluindo produtos alimentícios consumidos crus. <i>Categoria B:</i> irrigação, inclusive hidroponia, de produtos alimentícios não consumidos crus e não alimentícios, forrageiras, pastagens, árvores, revegetação e recuperação de áreas degradadas.
Ceará (2017)	Reúso urbano	Utilização de água de reúso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil e combate a incêndio.
	Reúso agrícola e florestal	Utilização de água de reúso para irrigação na produção agrícola e cultivo de florestas plantadas, tendo ainda como subproduto a recarga de lençol subterrâneo.
	Reúso ambiental	Utilização de água de reúso para implantação de projetos de recuperação ambiental.
	Reúso industrial	Utilização de água de reúso em processos, atividades e operações industriais.
São Paulo (2020)	Reúso na aquicultura	Utilização de água de reúso para a criação de animais ou para o cultivo de vegetais aquáticos.
	Reúso urbano	<i>Classe A:</i> irrigação paisagística; lavagem de logradouros e espaços públicos e privados; construção civil; desobstrução de galerias; lavagem de veículos; combate a incêndio. <i>Classe B:</i> todos os anteriores, exceto combate a incêndio.
Rio Grande do Sul (2020)	Reúso agrícola e florestal	Aplicação de água de reúso para produção agrícola, cultivo de florestas plantas e recuperação de áreas degradadas.
	Reúso industrial	Utilização não potável de água de reúso em processos, atividades e operações industriais.
	Reúso urbano	<i>Classe A:</i> água de reúso destinada à irrigação paisagística em locais de acesso irrestrito, lavagem de logradouros públicos e lavagem de veículos. <i>Classe B:</i> água de reúso destinada à irrigação paisagística em locais de acesso limitado ou restrito, ao abatimento de poeira, aos usos na construção civil e em estações de tratamento de efluente e à desobstrução de redes de esgoto pluvial e/ou cloacal.
Minas Gerais (2020)	Reúso agressilvipastoril	<i>Ampla:</i> Fertirrigação superficial, localizada ou por aspersão. Limitado: Fertirrigação superficial ou localizada, evitando-se contato da água de reúso com o produto alimentício.
	Reúso ambiental	Aplicação de água para reúso em projetos de recuperação florística ou de áreas degradadas, para fertirrigação superficial, localizada ou aspersão, desde que o acesso a estas áreas seja controlado.
	Reúso industrial	Reúso de água em operações e processos industriais, uso na construção civil, mineração, processos de produção e demais atividades em suas expertises;
	Reúso urbano	<i>Ampla:</i> Lavagem de pátios, logradouros ou outros com exposição similar; lavagem de veículos comuns; descargas sanitárias. Limitado: Lavagem de veículos especiais e externa de trens e aviões, controle de poeira, combate a incêndio, desobstrução de galerias.
Brasil (2021)	Reúso para fertirrigação	<i>Fertirrigação:</i> técnica de adubação que utiliza a água de irrigação ou efluentes para levar nutrientes ao solo, que compreende em aplicar qualquer elemento químico de interesse agrônômico, sendo estes de origem orgânica ou inorgânica via água de irrigação.
Distrito Federal (2022)	Reúso de água não potável	<i>Usos previstos:</i> descarga de bacias sanitárias e mictórios; lavagem de logradouros, pátios, garagens e áreas externas; lavagem de veículos; irrigação para fins paisagísticos; e uso ornamental (fontes, chafarizes e lagos).

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2020); Bahia (2010); Ceará (2017); São Paulo (2020); Rio Grande do Sul (2020); Minas Gerais (2020); Brasil (2021); Distrito Federal (2022).

2.1 Usos Urbanos

Os principais parâmetros abordados quanto ao reúso para fins urbanos nas legislações nacionais e discutidos neste trabalho são apresentados na Tabela 2. Os parâmetros que foram exigidos apenas pela legislação do Ceará para fins urbanos com utilização de efluentes não sanitários não foram analisados neste trabalho, sendo esses: temperatura, materiais sedimentáveis, óleos minerais, óleos vegetais e gorduras animais, materiais flutuantes, cor aparente, sulfeto, nitrogênio amoniacal total, sulfato, DQO, cianeto total, cianeto livre e boro.

No que diz respeito ao uso urbano, a classificação do grau de restrição é realizada pelas leis de Minas Gerais e Rio Grande do Sul e se referem à

possibilidade de contato da água residuária com indivíduos em circulação. Uma divisão também é realizada por São Paulo, mas não é estabelecido a que se refere a distinção de classes; no entanto, para usos restritos, não é permitida a utilização das águas residuárias para combate de incêndios.

Para usos urbanos, os valores de pH estabelecidos pelas legislações são semelhantes, assim como ovos de helmintos e condutividade elétrica. As legislações do Ceará e de Minas Gerais determinam o mesmo padrão de coliformes termotolerantes para fins menos restritivos, no valor de 10^3 NMP·100mL⁻¹. Já para usos com possibilidade de contato direto com indivíduos (o que exige uma qualidade melhor da água), a Organização Mun-

dial de Saúde (OMS) estabelece um valor máximo de 200 NMP·100mL⁻¹ (OMS, 1989), sendo esse mesmo valor estabelecido pelas resoluções do Rio Grande do Sul e de São Paulo, para usos mais amplos, e do Distrito Federal, de maneira geral.

O estado de São Paulo considera parâmetros específicos para uso em irrigação paisagística, já

que há contato direto com o solo, sendo esses: cloreto, condutividade elétrica, razão de adsorção de sódio e boro. A legislação determina padrões diferentes para sólidos suspensos totais, turbidez e cloro, considerando-se casos de filtração por membrana ou não.

Tabela 2 - Parâmetros para uso de ART para fins urbanos.

Parâmetros		Valores Máximos							
		CE	RS		SP		MG		DF
		- ^c	A	B	A	B	Am	L	-
pH	-	6-8,5	-	-	6-9	6-9	6-9	6-9	6-9
SST	mg·L ⁻¹	-	-	-	NA ou 0,5 _{FM}	30	-	-	-
Turbidez	NTU	-	-	-	2 ou 0,2 _{FM}	-	-	-	5,0
Coliformes	mg·100mL ⁻¹	5.000 1.000 ^a	200	1.000	ND	200 _{Clor} ou 120 _{E.coli}	1.000	10.000	200 _{E.coli}
Ovos de helmintos	ovo·L ⁻¹	-	1	NA	1 _{helm} 0,1 _{Asc}	1 _{helm} 0,1 _{Asc}	1	1	-
Cloro	mg·L ⁻¹	-	-	-	> 1 ou > 0,5 _{FM}	> 1	-	-	0,5-5,0
Cloreto	mg·L ⁻¹	-	-	-	106 ^a	350 ^a	-	-	-
DBO	mg·L ⁻¹	-	-	-	10	30	-	-	20
CE	dS·m ⁻¹	3	3	3	0,7 ^a	3 ^a	-	-	3,2
Boro	mg·L ⁻¹	-	-	-	0,7 ^a	2 ^a	-	-	-
RAS ^b	-	-	12 ^a	12 ^a	3 ^a	3-9 ^a	-	-	-

Legenda: SST = Sólidos suspensos totais; Cloro = Cloro residual total; Coliformes = coliformes termotolerantes; DBO = Demanda bioquímica de oxigênio; CE = Condutividade elétrica; RAS = Razão de adsorção de sódio; A = Classe ou categoria A; B = classe ou categoria B; Am = Amplo; L = Limitado; NA = não se aplica; Helm = helmintos; Asc = *Ascaris*; FM = Filtração por membrana; ^a Para irrigação paisagística; ^b Condições específicas nas legislações. ^c Efluentes sanitários. **Fonte:** Ceará (2017); São Paulo (2020); Rio Grande do Sul (2020); Minas Gerais (2020); Distrito Federal (2022).

2.2 Usos agrícolas e florestais

Os parâmetros relacionados ao uso para fins agrícolas e florestais estão apresentados na Tabela 3. Por sua vez, a Tabela 4 apresenta os padrões dispostos na Resolução CONAMA nº 503/2021, para uso

de águas residuárias para fertirrigação. Vale ressaltar que a legislação nacional também exige o cumprimento dos parâmetros e valores máximos estabelecidos na Resolução CONAMA nº 430/2011, art. 16, II, que não são abordados neste trabalho.

Tabela 3 - Parâmetros para uso de ART para fins agrícolas e florestais ou agrossilvopastoris.

Parâmetros		Valores Máximos					
		BA		CE	RS	MG ^d	
		A	B	- ^b	-	Am	L
pH	-			6-8,5	6-9	6-9	6-9
Coliformes termotolerantes	NMP·100mL ⁻¹	1.000	10.000	ND ^a ou 10 ³	10.000	10.000	1.000.000
Ovos de helmintos	ovo·L ⁻¹	1	1	ND ^a ou 1	1	1	1
CE	dS·m ⁻¹	0,2-3 ^c	0,2-3 ^c	3	0,2-2,9 ^c	> 0,5	> 0,5
RAS	-	0-40	0-40	15	0-12	3	3

Legenda: CE = Condutividade elétrica; RAS = Razão de adsorção de sódio; A = Classe ou categoria A; B = classe ou categoria B; Am = Amplo; L = Limitado; ND = não detectado; ^a Cultura a ser consumida crua; ^b Para efluentes sanitários; ^c Condições específicas associadas com a RAS. **Fonte:** Bahia (2010); Ceará (2017); Rio Grande do Sul (2020); Minas Gerais (2020).

Inicialmente, destaca-se que em relação ao uso para fins agrícolas, Bahia e Minas Gerais classificam os usos de acordo com as culturas a serem irrigadas. E, embora a legislação do estado do Ceará não defina categorias, há uma diferenciação somente para os parâmetros “coliformes termotolerantes” e “ovos de helmintos” para o caso de culturas consumidas cruas.

Tabela 4 - Parâmetros Resolução CONAMA nº 503/2021 para fertirrigação com uso de águas residuárias de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias.

Parâmetros		Valores Máximos
pH	-	5 – 9
Óleos minerais	mg·L ⁻¹	20
Óleos vegetais e gorduras animais	mg·L ⁻¹	50
<i>E. coli</i>	NMP·100mL ⁻¹	1.000 ^a ou 10.000 ^b

Legenda: ^a Cultura a ser consumida crua com contato da parte comestível e do solo; ^b Outras culturas e pastagens.

Fonte: Brasil (2021).

No estado da Bahia, a classificação é realizada de acordo com a forma de consumo da cultura, se esta se dá da forma crua ou não, com padrões distintos para cada categoria. No estado de Minas Gerais, o uso é denominado agrossilvipastoril e apresenta uma categorização referente ao contato com as culturas alimentícias, sendo proibido o reúso para produção de alimentos consumidos crus. Esses níveis de restrição mais acentuados para as culturas consumidas na forma crua estão relacionados à maior possibilidade de contaminação microbiológica de usuários que consomem os alimentos irrigados com ART (SANTOS et al., 2020).

No entanto, estudos de Rebelo et al. (2020) e Lima et al. (2021) demonstram que a aplicação de metodologias de avaliação de risco, considerando o uso de multibarreiras (físicas, química e biológicas), podem reduzir consideravelmente o risco, mesmo no caso de consumo das culturas em cru. Ao se considerar métodos de irrigação

que levam ao entendimento de maior risco de contaminação (e.g. sulcos e inundação) também podem apresentar risco aceitável, levando-se em consideração tanto as multibarreiras, como o tipo de cultura consumida após descascamento, processamento e cozimento, como é o caso do arroz (LIMA et al., 2022).

Nos casos dos parâmetros pH, ovos de helmintos e condutividade elétrica, as legislações apresentam padrões semelhantes. Quanto aos valores máximos para coliformes termotolerantes nas ART, a legislação cearense é a mais restritiva, exigindo que não sejam detectados para irrigação de culturas consumidas cruas e cuja parte consumida tenha contato direto com a ART; para as demais culturas o padrão é 10³ NMP·100mL⁻¹, sendo esse valor dez vezes inferior ao determinado pelas demais. Apesar de os valores restritivos indicarem preocupação com a contaminação das culturas agrícolas, dos operadores, do solo e dos consumidores, ressalta-se que valores altamente restritivos podem inviabilizar a adoção de práticas de reúso, uma vez que tornam mais dispendiosos os processos de tratamento (SANTOS et al., 2020). Ainda, os métodos e sistemas de irrigação podem ser mais relevantes do que a própria forma de consumo, já que os receptores mais susceptíveis ao risco, inicialmente, podem ser os agricultores.

2.3 Usos ambientais e aquíicultura

Quanto ao uso de ART para fins ambientais, apenas as legislações do Ceará e de Minas Gerais determinam padrões que são apresentados na Tabela 5. Os dois documentos apresentam usos semelhantes, sendo a do Ceará menos específica quanto às aplicações. A legislação de Minas Gerais é menos restritiva quanto à indicação de contaminação fecal, sendo estabelecido o valor de 10⁶ NMP·100mL⁻¹ para coliformes termotolerantes, valor cem vezes maior que a do Ceará.

A resolução do Ceará é o único documento regulador, dentre os contemplados neste trabalho, que aborda os usos da ART para aquicultura. Ressalta-se que a aquicultura é de grande relevância para as atividades econômicas do Brasil

e, segundo Bastos et al. (2008), o Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), indicou padrão de coliformes termotolerantes de 10^3 e 10^4 org·100mL⁻¹, para água afluyente ao tanque e dentro do tanque, respectivamente.

Tabela 5 - Parâmetros para reúso com fins ambientais e para aquicultura.

Parâmetros		Valores Máximos		
		Ambiental		Aquicultura
		CE	MG	CE
pH	-	6,0–8,5	6,0–9,0	6,0–8,0
Coliformes termotolerantes	CT·100mL ⁻¹	10.000	1.000.000	1.000
Ovos de helmintos	ovo·L ⁻¹	1	1	ND
CE	dS·m ⁻¹	3	-	3
Temperatura	°C	-	-	40

Legenda: Coliformes = coliformes termotolerantes; CE = condutividade elétrica; ND = não detectado.

Fonte: Ceará (2017); Minas Gerais (2020).

3 MONITORAMENTO DO SOLO PARA USO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS TRATADAS NO BRASIL

Apesar de todas as legislações estudadas permitirem modalidades de uso de ART que envolvam o lançamento dos efluentes no solo, nem todas abordam aspectos regulamentadores quanto à proteção do mesmo.

A legislação da Bahia condiciona o uso das ART para fins agrícolas e/ou florestais a um projeto produzido por profissional habilitado que determine critérios e procedimentos para as áreas de aplicação, sendo estabelecido que a taxa de aplicação das ART deve ser definida com base na qualidade física, química e físico-química das mesmas, não estabelecendo, no entanto, valores norteadores. Ademais, essa legislação é pioneira, no Brasil, ao estabelecer que o solo no qual será lançada a água residuária deve ser caracterizado e monitorado periodicamente com valores definidos com base na Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. A Resolução CONAMA nº 420/2009 dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas

contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas.

Já a legislação do Ceará exige, para usos nos quais haja o lançamento de ART no solo, a elaboração de um relatório contendo: I - diagnóstico do solo com perfil, granulometria, teor de matéria orgânica, avaliação de taxa de infiltração/absorção e teor de metais constantes no Anexo II; II - teor total dos metais constantes no Anexo I, para o efluente; III - frequência e método de aplicação do efluente no solo; IV - declividade do local; V - nível e qualidade do lençol freático; VI - modelagem da dispersão; e VII - laudo conclusivo, com a anotação de responsabilidade técnica de um profissional habilitado, atestando a viabilidade ambiental do lançamento proposto. Tal legislação é a única que condiciona o lançamento da ART no solo à apresentação da modelagem de dispersão dos contaminantes no solo; apesar disso, não apresenta nenhum termo de referência quanto a sua elaboração (CEARÁ, 2017).

A legislação do Rio Grande do Sul exige que em áreas onde se deseje aplicar o lançamento de ART para fins agrícolas e florestais deve ser realizada, no primeiro licenciamento, uma análise do solo

que contemple os parâmetros: percentual de sódio trocável, condutividade elétrica, argila, pH, índice SMP, P, K, matéria orgânica, Al, Ca, Mg, H+Al, capacidade de troca catiônica, saturação de bases e saturação de alumínio e enxofre, Cu, Zn, Mn, Na, B, Ca, Ni, Pb, Hg, As, Mo, Se, V, Co, Ba, cromo hexavalente e cromo trivalente. Após essa primeira análise, o monitoramento da área será com base em análises anuais do solo (que incluam parâmetros estabelecidos pelo órgão licenciador). Ademais, a regulamentação também define que, para a utilização das ART, devem ser disponibilizados registros operacionais com informações sobre o volume aplicado no período, área efetiva de aplicação, distribuição, método, taxa de aplicação do efluente nas áreas, medidas de controle para minimizar o risco de contaminação em eventuais inconformidades e monitoramento.

Apesar de não apresentar exigências específicas quanto à análise do solo, a legislação de Minas Gerais é a única das normas estaduais que estabelece como padrão a prática de fertirrigação em detrimento à irrigação (SANTOS et al., 2020). O uso da prática sugere preocupação com a qualidade do solo, uma vez que implica na aplicação de doses de ART que promovam o atendimento das necessidades nutricionais de espécies vegetais, sem, entretanto, comprometer a qualidade do solo e das águas subterrâneas e o desenvolvimento das plantas (MINAS GERAIS, 2020; SANTOS et al., 2020).

A Resolução CONAMA n° 503/2021, apresenta, dentre as novidades, um capítulo exclusivo

para caracterização e manejo do solo. A legislação exige que antes da primeira aplicação dos efluentes de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos ou graxaria, sejam determinadas as características do solo, a seguir: I - análise de interesse agrônômico: pH, condutividade elétrica, matéria orgânica, P, K, Ca, Mg, Al, S, Na, B, Cu, Fe, Zn, Mn, H+Al; II - análise física: teores de areia, argila e silte; e III - ensaio de infiltração de água no solo.

Além disso, a resolução nacional também descreve aspectos da metodologia de monitoramento do solo, como a implantação de uma estação de monitoramento para cada 50 ha da área, e a coleta de amostras em três extratores de solução em profundidades com variação de 0 a 90 cm. Outro ponto relevante é que, além de condicionar o reúso à apresentação de um projeto agrônômico com definição, dentre outras, da taxa de aplicação do efluente, a legislação exige que essa mesma taxa seja reduzida caso a concentração dos elementos presentes na Tabela 6 supere os valores apresentados, ou caso a concentração de cobre e zinco alcance 80% do valor de prevenção do solo estabelecido na Resolução CONAMA n° 420/2009.

Bahia, São Paulo, Minas Gerais, Rio Grande do Sul e Brasil trazem considerações quanto aos valores de razão de adsorção de sódio das ART, por representar uma informação importante quanto à salinidade e permeabilidade do solo.

Tabela 6 - Valores recomendados na Resolução CONAMA n° 503/2021 para concentração de nitrogênio, potássio, fósforo e enxofre no solo.

Elemento	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
N (g·dm ⁻³)	-	0 – 7,9	8,0 – 14,9	≥ 15,0	-
K (mmolc·dm ⁻³)	0 – 0,7	0,8 – 1,5	1,6 – 3,0	3,1 – 5,9	≥ 6,0
P (mg·dm ⁻³)	0 – 5,9	6,0 – 14,9	15,0 – 40,0	41,0 – 79,9	≥ 80,0
SO ₄ ²⁻ -S (mg·dm ⁻³)	-	0 – 4,9	5 – 9,9	≥ 10,0	-

Legenda: N = nitrogênio; K = potássio; P = fósforo; e SO₄²⁻-S = teor de sulfato.

Fonte: Brasil (2021).

Valores de referência para cloro são adotados apenas pelas legislações de São Paulo e do Rio Grande do Sul. Esse parâmetro é relevante já que, em determinadas quantidades na ART lançada, pode prejudicar a estrutura do solo assim como no desenvolvimento das culturas (SANTOS et al., 2020).

Ressalta-se que, com exceção da resolução do Ceará, que traz no seu anexo II um conjunto de parâmetros orgânicos e inorgânicos, nenhuma das legislações apresentadas neste tópico determina valores limites de saturação do solo para contaminantes, nem exige modelagem da dispersão dos contaminantes lançados. Outra legislação a realizar a determinação de valores máximos para substâncias orgânicas no solo é a Resolução CONAMA nº 375/2006. A resolução nacional define procedimentos e critérios para o uso agrícola de lodo gerado em estações de tratamento de esgoto sanitário, estabelecendo padrões para compostos inorgânicos e agentes patogênicos possivelmente presentes no lodo utilizado, assim como diversos parâmetros a serem monitorados e as metodologias de amostragem e caracterização do lodo e do solo.

No entanto, para que o lançamento de ART seja possível, é necessário o estudo dos possíveis impactos gerados pela atividade, como, por exemplo, a contaminação do solo com consequente degradação da qualidade das águas subterrâneas. Uma vez que a movimentação de contaminantes no solo se dá por fenômenos de transporte de massa, torna-se importante o conhecimento dos mecanismos de transporte que dependem de três fatores principais, como: o meio poroso (solo), a substância poluente (soluto) e as condições ambientais do meio (THOMÉ e KNOP, 2006). São muitas as variáveis que afetam esses três fatores, e para que se possa ter uma avaliação da dispersão dos poluentes no solo e nas águas subterrâneas, podem ser utilizadas medidas de campo, modelagem física, modelagem elétrica ou modelagem matemática.

Uma ferramenta importante para auxiliar a tomada de decisões quanto ao lançamento de ART no solo é a modelagem do transporte e da retenção dos poluentes no meio poroso (OLIVEIRA et al., 2010). Para isso, é necessária a caracterização dos processos de sorção dos poluentes pelo solo e a obtenção de parâmetros utilizados nas equações de transporte de contaminantes. Os parâmetros podem ser obtidos por diversos métodos, com destaque aos ensaios de deslocamento miscível unidimensional em colunas de solo que são utilizados há bastante tempo e que permitem estabelecer condições de densidade e porosidade similares às de campo, provendo uma simulação adequada à situação real de lançamento (THOMÉ e KNOP, 2006). Alguns estudos têm sido conduzidos associando ensaios de deslocamento em colunas de solo a modelos matemáticos específicos, o que possibilita entender o comportamento dos solutos no meio poroso (ANDRADE et al., 2018; BASSO e KIANG, 2017; CARVALHO et al. 2021).

4 MODELOS PARA ESTUDO DA DISPERSÃO DE POLUENTES NO SOLO

4.1 Introdução

Para que o lançamento de ART seja possível, é necessário o estudo dos possíveis impactos gerados pela atividade, como, por exemplo, a contaminação do solo com consequente degradação da qualidade das águas subterrâneas. Dessa forma, torna-se importante o conhecimento dos mecanismos e parâmetros de transporte dos contaminantes envolvidos (THOMÉ e KNOP, 2006). A movimentação de contaminantes no solo se dá por fenômenos de transporte de massa. Estes dependem de três fatores principais, como: o meio poroso (solo), a substância poluente (soluto) e as condições ambientais do meio (THOMÉ e KNOP, 2006). As variáveis que afetam esses três fatores são diversas, e para que se possa ter uma avaliação da dispersão dos poluentes, sob a forma de soluto, no solo e nas águas

subterrâneas podem ser utilizadas medidas de campo, modelagem física, modelagem elétrica ou modelagem matemática.

Segundo Oliveira et al. (2013), uma ferramenta importante para auxiliar a tomada de decisões quanto ao lançamento de águas residuárias no solo é a modelagem do transporte e da retenção dos poluentes no meio poroso. Para isso é necessária a caracterização dos processos de sorção dos poluentes pelo solo e a obtenção de parâmetros utilizados nas equações de transporte de contaminantes no solo.

As águas residuárias podem ser fontes valiosas de macro e micronutrientes, como, por exemplo: nitrogênio (N), potássio (K), fósforo (P), zinco (Zn), ferro (Fe), manganês (Mn) e cobre (Cu) (OFORI et al., 2021), em concentrações que variam de acordo com a origem da AR. Estudos comprovam que o lançamento de ART no solo pode representar o incremento da concentração desses compostos na matriz do solo (GANJEGUNTE et al., 2017). A utilização de ART no solo pode ser uma importante ferramenta na redução do uso de fertilizantes, uma vez que garante a qualidade dos solos aráveis, para os quais uma redução de nutrientes pode afetar negativamente a produção dos alimentos (GANJEGUNTE et al., 2017).

Cada nutriente tem um papel importante no desenvolvimento das plantas. O nitrogênio é essencial para processos fisiológicos e biológicos das plantas e está presente na composição das proteínas, ácidos nucléicos e outros metabólitos das culturas. No solo, o elemento pode ser obtido na forma orgânica (proteínas, açúcares e outros) ou inorgânica (amônio, nitrito, nitratos e outros). O fósforo também se destaca quanto à importância para o crescimento da vegetação. Ele se diferencia de outros elementos por se fixar no solo e assim possuir baixa disponibilidade para absorção das plantas. O potássio também influencia no crescimento da vegetação, e está

disponível no solo nas formas solúvel, trocável e não trocável (OFORI et al., 2021). Já os micronutrientes participam em menor escala de processos físicos e químicos no solo e no metabolismo das plantas, sendo necessários em quantidades menores que os macronutrientes.

A capacidade do solo de armazenar carbono orgânico e matéria orgânica (MO) depende de fatores como uso do solo, composição da vegetação, pluviometria do local e teor de nutrientes do solo. Essa característica influencia outros indicadores, como a estabilidade do solo e a capacidade de retenção de contaminantes e nutrientes (BERNARDES et al., 2020). As águas residuárias podem ser fontes de matéria orgânica por apresentarem, em sua maioria, alto teor de carbono (OFORI et al., 2021). Bernardes et al. (2020) apontam que, em solos pobres em MO, o lançamento de ART (ou não tratadas) pode provocar o aumento das concentrações de MO, fenômeno não identificado em solos com conteúdo já considerado em níveis adequados. Isso também foi observado por Farhakhani et al. (2018), que atestaram uma mudança na composição da MO do solo.

Quando há acúmulo de sais na solução do solo, diz-se que o solo está salinizado. O mesmo pode acontecer nas águas subterrâneas. A salinidade causa um estresse osmótico à vegetação, por promover a redução na disponibilidade de água e nutrientes, o que interfere no crescimento e rendimento das culturas (OFORI et al., 2010). Esse parâmetro é considerado um dos mais importantes no que diz respeito ao lançamento de ART no solo, uma vez que o teor de sais nas águas pode acarretar a salinização temporal ou de longo prazo do solo e das águas subterrâneas (OFORI et al., 2021). A sodicidade diz respeito ao teor relativo de sódio solúvel e trocável do solo. O excesso de sódio trocável no solo e a baixa concentração de sais solúveis podem acarretar a dispersão e expansão das argilas, o que prejudica a estrutura do solo e outras características

como a permeabilidade, a capacidade de retenção de água e contaminantes, dentre outros. Para avaliar se um solo é ou não salino ou sódico, parâmetros que podem ser utilizados são a condutividade elétrica (CE), que segundo Ofori et al. (2021) é uma medida da salinidade do solo, e o percentual de sódio trocável. Por esse motivo, é importante avaliar a presença de sais nas águas residuárias. Abd-Elwahed (2019) afirma que o lançamento em longo prazo de água residuária no solo pode desencadear a elevação da salinidade e sodicidade do solo, especialmente águas ricas em sódio, apresentando um aumento de até 103% da CE e de até 52,3% da PST com o uso de esgoto doméstico.

Os metais pesados são um grupo com poucas definições, cujo acúmulo no solo representa sérios riscos para o meio ambiente e para a saúde humana, pois indicam um potencial de contaminação da água, dos solos e dos sedimentos. Também podem ser elementos tóxicos para seres humanos, plantas e animais, sendo acumulados através da cadeia alimentar (CHERFI et al., 2015). Os mais comumente encontrados são chumbo, cromo, arsênio, zinco, cádmio, cobre, mercúrio e níquel (CARVALHO, 2019). Quanto ao metabolismo vegetal, os metais pesados podem causar fitotoxicidade, impactar a fotossíntese, a abertura estomática e as comunidades microbianas (OFORI et al., 2021). Já para a saúde humana, os metais representam riscos, uma vez que alguns podem causar câncer e outros podem afetar os sistemas nervoso, enzimático, esquelético, circulatório, imunológico ou endócrino e órgãos vitais (CHERFI et al., 2015). Os solos naturalmente apresentam pequenas quantidades de metais pesados em sua composição, com uma alta capacidade de retenção para eles. Isso faz com que haja um acúmulo dos elementos no meio ambiente é a ação antrópica, que pode gerar uma alteração da sua disponibilidade no meio (OLIVEIRA et al., 2010). Algumas variáveis que podem alterar a mobilidade dos metais pesados

no solo são a forma em que o metal se encontra no solo, a capacidade de troca catiônica do solo, estrutura do solo, vegetação, concentração de nutrientes, teor de matéria orgânica, temperatura e pH (CARVALHO, 2021).

Os íons que se movimentam no solo são chamados solutos. Esses elementos podem ser absorvidos pelos vegetais presentes no meio, lixiviar para camadas mais profundas e ser precipitados (SANTOS et al., 2010; BASSO e KIANG, 2017). Alguns fatores que afetam o deslocamento dos solutos no solo são: características do líquido percolante (densidade, concentração, polaridade, solubilidade, volatilidade etc.), propriedades físico-químicas do solo e condições ambientais do meio poroso que influenciam os parâmetros de transporte dos solutos (SANTOS et al., 2010; SILVA et al., 2012).

Uma ferramenta importante para avaliar os impactos ambientais e os riscos de contaminação do meio ambiente quando há lançamento de ART no solo é o estudo do transporte de solutos no solo, pois, em conjunto com o uso de modelos matemáticos, podem ser conhecidas características de íons específicos, como a maneira que interagem com os componentes do meio e sua movimentação e persistência no solo.

Os processos físicos de deslocamento de solutos e substâncias químicas no solo são controlados pelos fenômenos de advecção e dispersão hidrodinâmica (difusão molecular e dispersão mecânica). Esses fenômenos são influenciados pelas características locais, como condutividade hidráulica e umidade do solo, capacidade de troca catiônica do solo, pH, granulometria, estrutura e grau de estratificação do perfil do solo (OLIVEIRA et al., 2010).

No transporte por advecção, os contaminantes seguem o fluxo natural do líquido e se movem junto com a massa da água. Nesse mecanismo há uma relação direta com a velocidade do fluxo

hidráulico (OLIVEIRA et al., 2010). No mecanismo prevalece o movimento através dos macroporos e esse não influencia a concentração dos contaminantes na solução percoladora (CONCIANI, 2016).

Já a dispersão hidrodinâmica dos contaminantes se dá pelos fenômenos de difusão molecular e a dispersão mecânica, processos responsáveis pelo espalhamento das substâncias no solo e subsequente uniformização de suas concentrações no solo.

A difusão molecular é um processo espontâneo no qual há o espalhamento das espécies químicas quando há diferença de concentração, passando da zona com maior concentração para a zona com menor concentração (OLIVEIRA et al., 2010). Esse mecanismo de transporte não depende da velocidade do fluido e é o predominante nos meios porosos nos quais a velocidade é mais lenta (CONCIANI, 2016). Por sua vez, o processo de dispersão mecânica é decorrente das variações da velocidade do fluido no interior dos poros em relação à velocidade média de água nos poros (BASSO; KIANG, 2017). Esse processo acontece pelo movimento da água e ocorre tanto em fluxo longitudinal como em fluxo tangencial, provocando um espalhamento do material.

Os processos químicos possuem naturezas variadas. Estes apresentam interações complexas, de difícil separação do contaminante e dependem das propriedades do solo e da solução percoladora. A sorção determina a movimentação e a persistência dos contaminantes no solo e possui influência sobre o retardamento do avanço da pluma de contaminação do solo. O mecanismo pode acontecer de forma física e/ou química (CARVALHO, 2021). No processo físico, as cargas elétricas superficiais das partículas de solo vão fazer com o que o soluto fique aderido. Esse fenômeno pode se dar pela: atração e repulsão eletrostática segundo a Lei de Coulomb, interações dipolo-dipolo, forças de Van der Waals e pontes

de hidrogênio (CONCIANI, 2016). Já o outro caso, quando há uma interação química, caracteriza um fenômeno de difícil reversão, uma vez que as ligações entre o soluto e os átomos superficiais costumam ser covalentes. A sorção é mais comum com matéria orgânica e em argilominerais, que apresentam maior capacidade de troca iônica que os siltes e areias (CONCIANI, 2016). Segundo Carvalho (2021), a partir desse conhecimento é possível concluir que solos com maiores teores de argila e matéria orgânica possuem maior capacidade de retenção. A dessorção caracteriza os processos reversíveis de sorção. Nela, cátions e ânions são liberados na solução líquida, em função das características do meio, da redução na concentração da substância no líquido percolador, e da competição do soluto com outro composto com maior potencial de adsorção (CARVALHO, 2021).

4.2 Parâmetros de transporte de contaminantes

O uso de modelos de simulação é importante para a compreensão dos processos de transporte de solutos no solo. Nesses modelos, são utilizados parâmetros que descrevem a relação solo-soluto, sendo alguns: coeficiente de dispersão hidrodinâmica (D), número de Peclet (Pe) e fator de retardamento (R) (CARVALHO, 2021).

O parâmetro D é um parâmetro físico, expresso em área por tempo, que descreve os processos de difusão molecular e de dispersão mecânica, uma vez que não podem ser separados no transporte de contaminantes em meios porosos (GENUCHTEN e WIERENGA, 1986).

O número de Peclet é utilizado para auxiliar o entendimento sobre a influência de cada processo na dispersão hidrodinâmica. Esse parâmetro é adimensional e compara os dois transportes (CARVALHO, 2021). De acordo com modelo proposto por Ribeiro e Ehrlich (1994), números de

Peclet menores que 1 indicam a predominância da difusão molecular e valores maiores que 1 a da dispersão mecânica.

O parâmetro R, por sua vez, descreve as interações entre contaminantes e solo e inclui os processos sorcivos. Para a determinação desse parâmetro pode ser utilizado o ensaio de sorção ou a análise da curva de eluição obtida em colunas de lixiviação (OLIVEIRA et al., 2010). De acordo com Valocchi (1984), esse fator representa a relação de defasagem entre a velocidade de avanço do soluto reativo e a velocidade média da água no poro, o que indica a capacidade de retenção do solo para determinado composto.

A equação que rege o fenômeno do transporte de contaminantes no solo é a apresentada na Eq. 1 e envolve os fenômenos descritos acima: sorção, dispersão, advecção, e as possíveis reações dos contaminantes com o solo ao longo do tempo.

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{Rx-vt}{\sqrt{4DRt}} \right) - \left(1 + \frac{vx}{D} + \frac{v^2t}{DR} \right) e^{(vx/D)} \operatorname{erfc} \left(\frac{Rx+vt}{\sqrt{4DRt}} \right) \right] + \sqrt{\frac{v^2t}{\pi DR}} e^{-\frac{(Rx-vt)^2}{4DRt}} \quad (2)$$

Em que:

C = concentração do soluto na solução efluente (mg.L⁻¹);

C_o = concentração da solução deslocadora (mg.L⁻¹);

R = fator de retardamento;

x = comprimento da coluna de solo (cm);

t = tempo (h);

D = coeficiente de dispersão hidrodinâmica (cm².h⁻¹);

v = velocidade média da solução na coluna de solo (cm.h⁻¹);

erfc = função erro complementar.

Já a dispersividade do meio poroso é um parâmetro ligado diretamente às características do próprio solo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_x \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{B_d}{\theta} \frac{\partial C^*}{\partial t} + \left(\frac{\partial C}{\partial t} \right)_{rxn} \quad (1)$$

Em que:

C = concentração do soluto na fase líquida;

t = tempo;

D_L = coeficiente de dispersão longitudinal;

v_x = velocidade média da água subterrânea;

B_d = densidade volumétrica do aquífero;

θ = quantidade de umidade ou porosidade do meio saturado;

C* = quantidade de soluto sorvido por unidade de massa sólida;

rxn = subscrito que indica reação química ou biológica (outra que não sorção).

Genuchten e Wierenga (1986) apresentaram uma solução analítica da equação de transporte apresentada na Eq. 2.

Diversos são os métodos de determinação dos parâmetros físicos de transporte. Pode-se dar destaque aos ensaios de deslocamento miscível unidimensional em colunas de solo por serem utilizados há bastante tempo e por permitirem condições de densidade e porosidade do solo similares às de campo, provendo uma simulação adequada à situação real de lançamento de ART (THOMÉ e KNOP, 2006). Alguns estudos têm sido conduzidos para avaliar a mobilidade de solutos no solo utilizando ensaios de deslocamento em colunas de solo (ANDRADE et al., 2018; BASSO e KIANG, 2017; CARVALHO et al. 2021; OLIVEIRA et al., 2010), associados aos modelos matemáticos apresentados acima, o que possibilita entender o comportamento dos solutos no meio poroso. Na Tabela 7 são apresentados alguns dos parâmetros obtidos em diversos estudos sobre o tema.

4.3 Ensaio em colunas de lixiviação e análise de curvas BTC

O ensaio em colunas de lixiviação diz respeito à percolação de uma solução do contaminante através de uma coluna cilíndrica preenchida com uma amostra deformada ou indeformada de solo da área estudada. São coletadas amostras do líquido efluente, em intervalos pré-definidos, para análise das concentrações dos contaminantes avaliados. A partir dos valores de concentração do contaminante ao passar pela coluna de solo (C) e da concentração inicial do contaminante na solução deslocadora (C0) é possível obter a cur-

va de chegada (breakthrough curves, BTC), que expressa em gráfico a concentração relativa do contaminante (C/C0) em função do número de volume de poros da solução coletada após passar pela coluna de solo. O experimento pode se dar tanto em fluxo descendente como em ascendente. E, para se estabelecer o regime permanente, pode ser iniciado com a percolação de água destilada. Em estudo publicado por Conciani (2016) são apresentados possíveis comportamentos das curvas de chegada (Fig. 2), que podem indicar características da relação entre o contaminante e o solo.

Tabela 7 - Estudos relacionados à determinação de parâmetros de mobilidade de contaminantes no solo.

Metal	Classificação textural do solo	R	D (cm ² .h-1)	Ajuste (r ²)	Estudo
Cádmio	Resíduo da Construção Civil	3,49	32,92	-	Moreira et al. (2010)
	Franco arenoso	0,98	52,25	0,97	Oliveira et al. (2010)
	Muito argiloso	3,34	19,53	0,99	Oliveira et al. (2010)
	Argiloso arenoso	5,9	0,04	-	Conciani (2016)
Cálcio	Franco argiloso arenoso	1,70	64,19	-	Santos et al. (2010)
	Franco arenoso	1,67	270,12	-	Santos et al. (2010)
	Arenoso	1,51	391,78	-	Santos et al. (2010)
	Argiloso	1,98	41,46	-	Matos et al. (2013)
	Franco argiloso arenoso	1,27	9,01	-	Matos et al. (2013)
	Muito argiloso	1,11	0,54	-	Matos et al. (2013)
Chumbo	Arenoso	0,56	4304,17	0,85	Carvalho et al. (2021)
	Resíduo da Construção Civil	7,48	37,64	-	Moreira et al. (2010)
	Argiloso arenoso	25,2	0,18	-	Conciani (2016)
Cobre	Resíduo da Construção Civil	6,4	37,64	-	Moreira et al. (2010)
	Argiloso arenoso	11,3	0,10	-	Conciani (2016)
Fósforo	Franco arenoso	2,1	1,74	-	Mahmood-Ul-Hassan, Rashid e Rafique (2011)
Lítio	Argiloso	1,32	48,48	0,99	Oliveira et al. (2013)
	Franco argiloso	0,73	3,83	0,99	Oliveira et al. (2013)
	Muito argiloso	0,83	22,81	0,99	Oliveira et al. (2013)
Magnésio	Franco argiloso arenoso	2,02	90,95	-	Santos et al. (2010)
	Arenoso	1,91	276,90	-	Santos et al. (2010)
	Argiloso	1,49	12,67	-	Matos et al. (2013)
	Franco argiloso arenoso	0,85	15,05	-	Matos et al. (2013)
	Muito argiloso	0,75	0,15	-	Matos et al. (2013)
	Franco arenoso	1	1,48	-	Mahmood-Ul-Hassan, Rashid e Rafique (2011)
Potássio	Arenoso	5,22	1,42	-	Basso e Kiang (2017)
	Franco argiloso arenoso	1,69	45,96	-	Santos et al. (2010)
	Arenoso	1,25	268,83	-	Santos et al. (2010)
	Argiloso	1,40	4,09	0,99	Silva et al. (2012)
	Argiloso	1,63	6,76	-	Matos et al. (2013)
	Franco argiloso arenoso	2,17	3,44	-	Matos et al. (2013)
	Muito argiloso	1,43	1,22	-	Matos et al. (2013)
	Arenoso	1,12	13,61	-	Andrade et al. (2018)
	Arenoso	1,67	512,50	0,95	Carvalho et al. (2021)

continua...

Tabela 7 - Continuação...

Metal	Classificação textural do solo	R	D (cm ² .h ⁻¹)	Ajuste (r ²)	Estudo
Sódio	Franco argiloso arenoso	2,33	144,91	-	Santos et al. (2010)
	Arenoso	1,48	216,04	-	Santos et al. (2010)
	Argiloso	2,03	464,22	0,98	Silva et al. (2012)
	Arenoso	1,68	27,60	-	Andrade et al. (2018)
	Arenoso	0,65	854,17	0,96	Carvalho et al. (2021)
Zinco	Resíduo da Construção Civil	5,97	26,34	-	Moreira et al. (2010)

Fonte: Adaptado de Carvalho (2021). R = fator de retardamento e D = coeficiente de dispersão hidrodinâmica

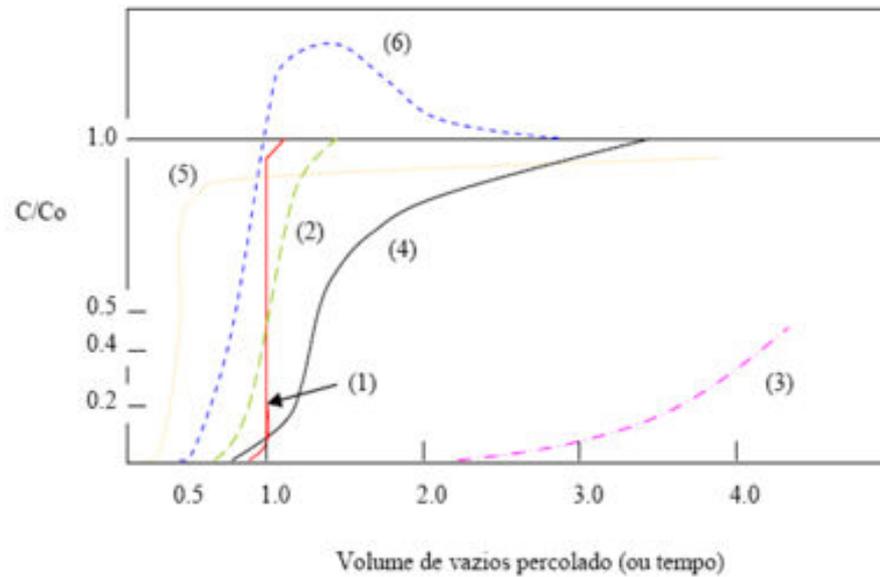


Figura 2 - Modelos de curva de chegada.

Fonte: Conciani (2016). C = concentração do contaminante ao passar pela coluna de solo e C₀ = concentração inicial do contaminante na solução deslocadora.

Na Fig. 2, o transporte advectivo uniforme e não disperso é representado pela curva (1); nesse transporte a concentração do contaminante na saída da coluna é igual à concentração de entrada para o primeiro volume de poros percolado, ponto no qual se entende que toda a água do solo foi deslocada pelo líquido percolador. Por sua vez, um movimento dispersivo (que apresenta tendência ao espalhamento da pluma de contaminação) é representado pela curva (2), visto que o composto já pode ser detectado antes de 1 volume poroso, em uma concentração relativa menor que um. Já a curva (3) mostra um forte processo adsorcivo, pois representa compostos que são completamente retidos pelo solo até o segundo volume poroso; solutos com esse

comportamento costumam apresentar altos valores de retardamento. A curva (4) indica que, por mais que haja chegada de contaminante antes de 1 volume poroso, há algum retardamento, comportamento que pode representar um fluxo através de canais, com espécies químicas que reagem com o solo, podendo haver equilíbrio através da difusão. A análise da curva (5) indica que o fluxo do líquido através do solo é rápido, com solutos que não reagem com o meio poroso, passando rapidamente pela coluna; um solo com esse comportamento atingirá lentamente o equilíbrio por meio da difusão nos microporos. E, por fim, o fenômeno da dessorção é representado pela curva (6); nesse processo, a concentração dos compostos na saída da coluna de solo se

torna maior do que na entrada (CONCIANI, 2016; CARVALHO, 2021).

Nielsen e Biggar (1962) afirmam que o retardamento na velocidade de avanço do soluto em relação à velocidade média de avanço da solução percoladora pode ser identificado quando a curva de efluente se apresentar deslocada para a direita, ou seja, quando na curva a concentração relativa de 0,5 está à frente de 1 volume poroso. Esse comportamento indica que ao escoar através do perfil do solo, parte do soluto é adsorvida, sinalizando um fator de retardamento maior que a unidade. A partir desta análise se constata que, para a relação C/Co de 0,5, quanto mais o valor de volume de poros percolados se distancia de 1, maior é a interação soluto-solo (MATOS et al., 2013).

5 CONCLUSÕES

Há um avanço na regulamentação do reúso de água em todo o mundo. Todavia, no Brasil ainda é necessária a ampliação e o incentivo para que a prática possa estar vastamente desenvolvida e disseminada. Assim, foi possível concluir que é importante o estímulo dos órgãos de gestão, um trabalho educador dos usuários quanto aos usos e possibilidades, e a consolidação de um amparo normativo que promova segurança técnica e legal aos produtores e consumidores da ART condizente com a realidade do tratamento de esgoto nacional.

Concluiu-se, também, que existe uma grande diferença entre os padrões de qualidade adotados pelas regulamentações de Bahia (2010), Ceará (2017), São Paulo (2020), Rio Grande do Sul (2020), Minas Gerais (2020), Brasil (2021) e Distrito Federal (2022), alguns com exigências altamente restritivas que não condizem com a realidade socioeconômica do Brasil. Padrões mais flexíveis podem garantir segurança tanto em relação à saúde pública como em relação à contaminação de solo e águas subterrâneas, cienti-

ficamente comprovado, desde que obedçam a práticas adequadas e responsáveis de uso.

Apesar da maioria dos usos de ART envolver o lançamento no solo, poucas são as legislações que demonstram preocupação direta com a dispersão dos poluentes e manutenção da qualidade do solo e das águas subterrâneas. Ademais, pelo fato de não haver nenhum método consolidado de avaliação da dispersão de poluentes no solo, há uma grande complexidade em exigir a aplicação de metodologias de monitoramento nas legislações atualmente em vigor no país.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Carvalho CB, Santos AB; **Investigação:** Carvalho CB; **Orientação:** Santos AB; **Redação:** Carvalho CB, Mota S, Santos ASP, Santos AB.

7 REFERÊNCIAS

- ABD-ELWAHED, M. S. Effect of long-term wastewater irrigation on the quality of alluvial soil for agricultural sustainability. *Annals of Agricultural Sciences*, v. 64, p. 151-160, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.aos.2019.10.003>
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Relatório pleno, Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021**. Brasília: ANA, 2021.
- ANDRADE, C.W.L. et al. Simulation of sodium and potassium dynamics by the HYDRUS 2D model in a haplic planosol via residue water. *Engenharia Agrícola*, v. 38, n.36, p.874-884, 2018. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n6p874-884/2018>
- BAHIA. Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídrico (CONERH) n. 75. Estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e/ou florestal. *Diário Oficial do Estado*. 2010.
- BASSO, J.B.; KIANG, C. H. Retardamento e dispersão hidrodinâmica de cobre, potássio e cloreto em solos residuais do subgrupo itararé no estado de São Paulo. *Águas Subterrâneas*, v. 31, n.1, p.117-133. 2017. <https://doi.org/10.14295/ras.v31i1.28638>
- BASTOS, R.K.X.; KIPERSTOK, A.; CHERNICHARO, C.A.L.; FLORENCIO, L.; MONTEGGIA, L.O.; SPERLING, M. Von, AISSE, M.M.; BEVILACQUA, P. D.; PIVELLI, R.P. Subsídios à regulamentação do

- reúso da água no Brasil. **Revista DAE**, v. 50, 2008. <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.016>
- BRASIL. Resolução CONAMA nº. 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**. 2006.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº. 420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**. 2009.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº. 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**. 2011.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº. 503, de 14 de dezembro de 2021. Define critérios e procedimentos para o reúso em sistemas de fertirrigação de efluentes provenientes de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias. **Diário Oficial da União**. 2021.
- CARVALHO, C. B.; PEREIRA, E. L., DOS SANTOS, A. B. Mobilidade de contaminantes em solos arenosos após a aplicação de águas residuárias tratadas produzidas em indústria siderúrgica. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 26, n.5, p. 816-828, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200339>
- CARVALHO, C. B. **Estudos de mobilidade de contaminantes no solo e de confiabilidade para avaliar o uso de águas residuárias tratadas em indústrias siderúrgicas**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2021.
- CEARÁ. Resolução n. 02 do Conselho Estadual Do Meio Ambiente (COEMA), 02 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras. **Diário Oficial do Estado**, 21 de fevereiro de 2017.
- CONCIANI, R. **Estudo Comparativo da Mobilidade de Contaminantes Inorgânicos em Solos Laterítico e Não Laterítico**. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2016, 86 p.
- DISTRITO FEDERAL. Resolução n. 05 da Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA), 09 de maio de 2022. Estabelece diretrizes para o aproveitamento ou reúso de água não potável em edificações no Distrito Federal. **Diário Oficial do Estado**, 10 de maio de 2022.
- GANJEGUNTE, G.; et al. Effects of treated municipal wastewater irrigation on soil properties, switchgrass biomass production and quality under arid climate. **Ind. Crop. Prod.**, v. 99, p. 60–69. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.01.038>
- GENUCHTEN, M. T.; WIERENGA, P. J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: **Methods of soil analysis, Part 1**. Madison: American Society of Agronomy - Soil Science Society of America, p. 1025-1054. 1986. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c44>
- JONES, E. R.; et al. Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. **Earth System Science Data**, v. 13, p. 237–254. 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-237-2021>
- LIMA, M. A. M.; SANTOS, A.S.P.; VIEIRA, J.M.P. Irrigação com água de reúso no Brasil: aplicação do modelo semiquantitativo de avaliação de risco microbiológico para saúde humana. **Revista Gesta**, v. 9, n. 2, p. 71-86. 2021. <https://doi.org/10.9771/gesta.v9i2.45534>
- LIMA, M.A.M.; SANTOS, A.S.P.; REBELO, A.; LIMA, M.M.; VIEIRA, J.M.P. Water reuse in Brazilian rice farming: Application of semiquantitative microbiological risk assessment. **Water Cycle**, v. 3, p. 56-64. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2022.04.003>
- MAHMOOD-UL-HASSAN, M.; RASHID, M.; RAFIQUE, E. Nutrients transport through variably structured soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 57, p.331-340, 2011. <https://doi.org/10.1080/00380768.2011.559576>
- MATOS, A. T.; GARIGLIO, H.A.A.; MONACO, P. A.V. L. Deslocamento miscível de cátions provenientes da vinhaça em colunas de solo. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Amb.**, v.17, n.7, p.743–749, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000700008>
- MINAS GERAIS. Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Recursos Hídrico (CERH) n. 65. Diretrizes, modalidades e procedimentos para o reúso direto de água não potável, proveniente de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários (ETE) de sistemas públicos e privados. **Diário Oficial do Estado**. 2020.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Elaboração de proposta do plano de ações para instituir uma política de reúso de efluente sanitário tratado no Brasil**, 2018. Disponível em: <produto6_plano_de_acoes_e_politica_de_reuso.pdf (mdr.gov.br)>. Acesso em: mar. 2022.
- MOREIRA, D. A. et al. Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de metais pesados em resíduos da construção civil e demolição. **Rev. Ambi. & Água**, v. 5, n. 2, p. 77-86. 2010. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.138>
- NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Miscible displacement: III, Theoretical considerations. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.26, p.216-221. 1962. <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600030010x>

- OFORI, S.; PUSKACOVA, A.; RUZICKOVÁ, I.; WANNER, J. Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. **Science of the Total Environment**, v. 760, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144026>
- OLIVEIRA, F. C.; et al. Adsorção e deslocamento do íon cádmio em solos do cerrado. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Amb.**, v.14, n.8, p.848-855. 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000800009>
- RDA – Reúso de Água. **Mapa esquemático do percentual de reúso de água em diferentes regiões do mundo**. Disponível em: <<https://reusodeagua.org/producao-de-dados/>>. Acesso em: abr. de 2022.
- REBELO, A.; QUADRADO, M.; FRANCO, A.; LACASTA, N.; MACHADO, P. Water reuse in Portugal: New legislation trends to support the definition of water quality standards based on risk characterization. **Water Cycle**, v. 1, p. 41-53. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.006>
- RIBEIRO, S. G. S., EHRLICH, M. Discussão a respeito da modelagem da dispersão hidrodinâmica em meios porosos. In: Simpósio sobre Geotecnia de Aterros para Disposição de Resíduos, COPPE/UFRJ, pp. 2.29-2.36, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1994. **Anais...**
- RIO GRANDE DO SUL. Resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) n. 419. Critérios e procedimentos para a utilização de água de reúso para fins urbanos, industriais, agrícolas e florestais no Estado do Rio Grande do Sul. **Diário Oficial do Estado**. 2020.
- SANTOS, A. S. P.; GONÇALVES, R.F.; MELO, M.C.; LIMA, M.A.M.; ARAUJO, B.M. Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reúso no Brasil. **Sustinere**, v. 8, p. 437-462, 2020. <https://doi.org/10.12957/sustinere.2020.48976>
- SANTOS, A. S. P.; PACHAWO, V.; MELO, M. C.; VIEIRA, J. M. P. Progress on legal and practical aspects on water reuse with emphasis on drinking water – an overview. **Water Supply**, v. 22, n. 3, p. 3000-3014. 2022. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.412>
- SANTOS, A. S. P.; VIEIRA, J. M. P. Reúso de água para o desenvolvimento sustentável: aspectos de regulamentação no Brasil e em Portugal. **Revista Gesta**, v. 8, n. 1, p. 50-68. 2020. <https://doi.org/10.9771/gesta.v8i1.36462>
- SANTOS, J. S. et al. Mobilidade de solutos em colunas de solo com água residuária doméstica e de suinocultura. **Rev. Bras. de Eng. Agríc. e Amb.**, v. 14, n. 11, p. 1226-1233. 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010001100013>
- SÃO PAULO. Resolução conjunta SES/SIMA n. 1/2020. Disciplina o reúso direto não potável de água, para fins urbanos, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário. **Diário Oficial do Estado**. 2020.
- SGROI, M.; VAGLIADASHI, F. G.A.; ROCCARO, P. Feasibility, sustainability and circular economy concepts in water reuse. **Environmental Science & Health**, v. 2, p. 20-25. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.01.004>
- THOMÉ, A.; KNOP, A. Movimento de Contaminantes no Solo. In: II Simpósio Nacional de Uso da Água na Agricultura, Passo Fundo, 2006. **Anais...**
- TORRETTA, V.; KATSOYIANNIS, I.; COLLIVIGNARELLI, M. C.; BERTANZA, G.; XANTHOPOULOU, M. Water reuse as a secure pathway to deal with water scarcity. **MATEC Web of conferences**, v. 305. 2020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202030500090>
- VALOCCHI, A.J. Describing the transport of ion-exchanging contaminants using an effective Kd approach. **Water Resources Research**, v. 20, p. 499-503. 1984. <https://doi.org/10.1029/WR020i004p00499>
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Health guidelines for use of wastewater in agriculture and aquaculture**. Geneva: WHO, 1989.