

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Karoline Boeing de Souza

Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico para reuso de lodo na agricultura:
Aplicação dos limites das Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020

Florianópolis

2022

Karoline Boeing de Souza

Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico para reuso de lodo na agricultura:

Aplicação dos limites das Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental
Orientador: Prof. Maria Elisa Magri

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra

Souza, Karoline Boeing de
Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico para reuso
de lodo na agricultura : Aplicação dos limites das
Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020 / Karoline Boeing de
Souza ; orientador, Maria Elisa Magri, 2022.
64 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Lodo. 3.
Reciclo. 4. Avaliação de Risco. 5. Agricultura. I. Magri,
Maria Elisa. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. III. Título.

Karoline Boeing de Souza

Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico para reuso de lodo na agricultura:

Aplicação dos limites das Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020

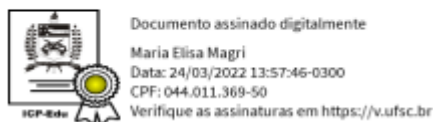
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Sanitarista e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 17 de março de 2022.



Prof.ª. Maria Elisa Magri, Dr.ª.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof.ª. Dr.ª. Maria Elisa Magri
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Leonardo Dalri Cecato, Msc.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Eng. Fernanda Daniela Ferreira Golçalves
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

O conhecimento é importante, mas precisamos ser bondosos e gentis conosco enquanto nos esforçamos para descobrir quem somos (Brené Brown).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela vida, pelas oportunidades colocadas no meu caminho, por estar comigo e me dar sabedoria nestes anos de aprendizado.

Agradeço aos meus pais Márcia e Arison, por nunca terem medido esforços para que eu pudesse ter acesso à uma educação de qualidade, por acreditarem em mim e pelo orgulho que sempre demonstraram ter pelas minhas conquistas. A minha irmã Mariana, pelos momentos em que compartilhamos os desafios e por me incentivar. À minha fiel companheira de quatro patas, Bela, pela companhia nas horas de estudo no quarto e pela paz que me trazia no seu olhar.

Ao meu companheiro de faculdade e da vida, meu noivo Matheus, que nunca me deixou desistir, sempre me incentivou e vibrou comigo nas pequenas conquistas, esteve ao meu lado nos momentos mais difíceis da graduação. Não foi apenas minha dupla da graduação, mas também meu porto seguro quando tudo parecia desmoronar.

À professora Maria Elisa Magri, pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho, pelas orientações e a sua calma em esclarecer aonde deveríamos chegar.

Aos meus colegas de trabalho da Construtora CFO, por estarem ao meu lado e compreenderem esse momento de dedicação.

Agradeço a oportunidade de estudar na Universidade Federal de Santa Catarina, especialmente o departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, por conceder ensino de qualidade e proporcionar meu desenvolvimento ao longo destes anos.

Agradeço, por fim, a todos aqueles que de alguma maneira estiveram comigo nestes anos e contribuíram para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

A rápida industrialização e o crescimento populacional são fatores determinantes na escassez de recursos naturais e no aumento dos resíduos de sistemas de tratamento de esgoto. Isto tem levado à busca por soluções mais adequadas para a disposição final do lodo de esgoto. O reciclo agrícola mostra-se como uma solução atrativa, com minimização dos impactos ambientais, redução dos custos dos sistemas de tratamento e da demanda por substâncias químicas na agricultura. No Brasil, para a regulação de tal alternativa de disposição final, existem duas normativas. A primeira delas é a Resolução CONAMA 375/2006, de cunho mais restritivo. Em seguida, de forma mais atualizada e com menores restrições, a Resolução CONAMA 498/2020. Motivado por este cenário, buscou-se realizar uma Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico para analisar os limites de concentração de organismos patogênicos das Resoluções. Os organismos avaliados foram *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus. Primeiramente, foi avaliado um cenário onde o agricultor é exposto através do manuseio do solo contendo lodo. Em seguida, o consumo de um vegetal que foi produzido em solo com lodo aplicado, onde este vegetal não passou por nenhum tipo de higienização. Por fim, foi examinado o consumo deste mesmo vegetal, mas com higienização por água corrente de boa qualidade. Ainda, foram apresentados casos reais de avaliação do potencial de reuso do lodo no Brasil. Os resultados para a AQRM demonstraram que o maior risco de infecção é encontrado no segundo cenário de avaliação, para o microrganismo *E. Coli*, seguido de helmintos, ambos para lodos classe B. Por outro lado, o menor risco de infecção observado foi para a *E. Coli*, seguido do risco para enterovírus, no primeiro cenário de avaliação. Por fim, os estudos de caso apresentados confirmaram o potencial de reuso do lodo de esgoto para fins agrícolas, principalmente quanto a presença de nutrientes necessários na agricultura e na ausência de riscos quanto à presença de patógenos nos lodos aplicados. Os resultados obtidos encorajam a adoção desta medida de disposição final dos lodos de esgoto, especialmente tendo em vista os benefícios que esta pode proporcionar à economia e ao meio ambiente.

Palavras-chave: Lodo; Reciclo; Avaliação de Risco; Agricultura; AQRM.

ABSTRACT

Rapid industrialization and population growth are determining factors in the scarcity of natural resources and the increase in waste from sewage treatment systems. This has led to the search for more adequate solutions for the final disposal of sewage sludge. Agricultural recycling is an attractive solution, minimizing environmental impacts, reducing the costs of treatment systems and the demand for chemical substances in agriculture. In Brazil, for the regulation of such an alternative of final disposal, there are two regulations. The first of these is CONAMA Resolution 375/2006, which is more restrictive. Then, in a more up-to-date way and with fewer restrictions, CONAMA Resolution 498/2020. Motivated by this scenario, an attempt was made to carry out a Quantitative Risk Microbiological Assessment to analyze the limits of concentration of pathogenic organisms in the Resolutions. The organisms evaluated were *Escherichia. Coli*, helminths, *Salmonella* and enterovirus. First, a scenario where the farmer is exposed through handling soil containing sludge was evaluated. Then, the consumption of a vegetable that was produced in soil with applied sludge, where this vegetable did not undergo any type of hygiene. Finally, the consumption of this same vegetable was examined, but with good quality running water. In addition, real cases of evaluation of the potential for sludge reuse in Brazil were presented. The results for QRMA showed that the highest risk of infection is found in the second evaluation scenario, for the microorganism *E. Coli*, followed by helminths, both for class B sludge. On the other hand, the lowest risk of infection observed was for the *E. Coli*, followed by risk for enterovirus, in the first assessment scenario. Finally, the case studies presented confirmed the potential for reuse of sewage sludge for agricultural purposes, mainly regarding the presence of nutrients needed in agriculture and the absence of risks regarding the presence of pathogens in the applied sludge. The results obtained encourage the adoption of this measure of final disposal of sewage sludge, especially in view of the benefits it can provide to the economy and the environment.

Keywords: Sludge; Recycling; Risk Assessment; Agriculture; QRMA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fases do tratamento de esgoto.....	18
Figura 2 – Detalhamento de um sistema convencional por nível de tratamento e geração de lodo.....	19
Figura 3 – Esquema das etapas de desenvolvimento da metodologia AQRM para reuso de lodo de esgoto na agricultura.....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Produção de lodo de esgoto em diferentes sistemas de tratamento.....	21
Tabela 2 – Caracterização e quantificação da produção de lodo segundo o tipo de tratamento do esgoto.....	22
Tabela 3 – Constituintes do lodo de alguns sistemas de tratamento de esgoto no Brasil (em % de matéria seca).	25
Tabela 4 – Concentrações máximas de patógenos, conforme classe de lodo, pela Resolução CONAMA 375/2006.	27
Tabela 5 – Classes A e B de lodo, segundo a Resolução CONAMA 498/2020, e seus requisitos de classificação.	29
Tabela 6 – Usos permitidos e respectivas restrições para lodos classe A.	29
Tabela 7 – Usos permitidos e respectivas restrições para lodos classe B.....	30
Tabela 8 – Volumes de solo ingeridos conforme via de exposição e população avaliada.	39
Tabela 9 – Concentrações dos patógenos para cálculo do risco.....	39
Tabela 10 – Características microbiológicas do lodo de esgoto anaeróbio após processo de solarização e os limites máximos impostos pela Resolução CONAMA 375/2006.....	43
Tabela 11 – Doses para <i>E. Coli</i> , helmintos, <i>Salmonella</i> e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 1.....	48
Tabela 12 – Probabilidade de infecção por <i>E. Coli</i> , helmintos, <i>Salmonella</i> e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 1.....	48
Tabela 13 - Doses para <i>E. Coli</i> , helmintos, <i>Salmonella</i> e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 2.....	51
Tabela 14 - Probabilidade de infecção por <i>E. Coli</i> , helmintos, <i>Salmonella</i> e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 2.....	51
Tabela 15 - Doses para <i>E. Coli</i> , helmintos, <i>Salmonella</i> e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 3.....	53
Tabela 16 - Probabilidade de infecção por <i>E. Coli</i> , helmintos, <i>Salmonella</i> e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 3.....	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
APA Área de Proteção Ambiental
APM Área de Proteção aos Mananciais
APP Área de Preservação Permanente
AQRM (QRMA) Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico
Ca Cálcio
CO₂ Dióxido de Carbono
CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente
C/N Relação Carbono e Nitrogênio
CNA Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil
ECC *European Economic Community*
E. Coli *Escherichia Coli*
EMBRAPA Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPI Equipamento de Proteção Individual
ETE Estação de Tratamento de Esgoto
K Potássio
Mg Magnésio
N Nitrogênio
NMP Número Mais Provável
OMS (WHO) Organização Mundial da Saúde
P Fósforo
pH Potencial Hidrogeniônico
PIB Produto Interno Bruto
PROSAB Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
S Enxofre
SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ST Sólidos Totais
UASB *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*
UFF Unidade Formadora de Foco
UFP Unidade Formadora de Placa
UGL Unidade de Gerenciamento de Lodo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral.....	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO	18
2.2	LODO DE ESGOTO	20
2.2.1	Caracterização do Lodo	22
2.2.2	Alternativas de Disposição Final	22
2.2.2.1	<i>Aplicação na Agricultura</i>	24
2.3	LEGISLAÇÃO PARA REUSO DO LODO.....	26
2.3.1	Resolução CONAMA 375/2006	26
2.3.2	Resolução CONAMA 498/2020	28
2.4	LIMITAÇÕES PARA REUSO DO LODO	30
2.4.1	Riscos associados ao uso de lodo.....	31
2.5	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO	32
2.5.1	Descrição do perigo.....	33
2.5.2	Avaliação da exposição.....	33
2.5.3	Modelo dose-resposta	34
2.5.3.1	<i>Modelo beta-Poisson</i>	34
2.5.3.2	<i>Modelo exponencial.....</i>	35
2.5.4	Caracterização do risco	35
3	METODOLOGIA.....	36
3.1	ESTUDOS DE CASO	36
3.2	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO	36
3.2.1	Descrição do perigo.....	37

3.2.2	Avaliação da exposição.....	38
3.2.3	Modelo dose-resposta	40
3.2.3.1	<i>Coliformes Termotolerantes</i>	<i>40</i>
3.2.3.2	<i>Helmintos.....</i>	<i>40</i>
3.2.3.3	<i>Salmonella</i>	<i>40</i>
3.2.3.4	<i>Vírus.....</i>	<i>41</i>
3.2.4	Caracterização do risco	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
4.1	ESTUDOS DE CASO	42
4.1.1	Uso agrícola e correção de pH de lodo de esgoto anaeróbio com pH ácido ...	42
4.1.2	Potencial agrônômico para uma gestão sanitária sustentável no Brasil: Reciclagem de nutrientes, patógenos e micro poluentes	44
4.1.3	Lodo de esgoto como matriz na fabricação de fertilizantes organominerais: formas físicas, riscos ambientais e reciclagem de nutrientes.....	45
4.2	AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO	48
4.2.1	Cenário 1 – Manuseio de solo/lodo.....	48
4.2.2	Cenário 2 – Ingestão de cenoura produzida em solo com aplicação de lodo, sem higienização	50
4.2.3	Cenário 3 - Ingestão de cenoura produzida em solo com aplicação de lodo, com higienização	53
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	56
	REFERÊNCIAS.....	59
	APÊNDICE A – Cálculo do risco de infecção para os três cenários avaliados	63
	APÊNDICE B – Cálculo do risco de infecção para os três cenários avaliados com redução das concentrações de E. Coli e helmintos nos lodos classe B das Resoluções CONAMA 375 e 498	64

1 INTRODUÇÃO

A rápida industrialização tem levado as pessoas a migrarem de pequenas cidades para grandes centros urbanos (DHANKER et al., 2021). Em paralelo, a expectativa de crescimento populacional dos próximos 30 anos combinada com a pressão por grandes produções agrícolas para suprir a demanda por alimentos geram duas grandes preocupações: o aumento da geração de resíduos sólidos, como o lodo, e uma possível escassez de nutrientes devido ao esgotamento das reservas minerais (RODRIGUES et al., 2021).

Estudos demonstram que o volume de lodo produzido em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) representa cerca de 1 a 2% do volume de esgoto tratado. Contudo, o custo para seu tratamento e disposição final pode atingir valores entre 30 a 50% do custo operacional da ETE (ANDREOLI *et al.*, 1999) e, portanto, não deve ser negligenciado. No Brasil, aproximadamente 41% do esgoto é coletado por sistemas de tratamentos urbanos e aproximadamente 71% disto é destinado a tratamentos primários, o que gera entre 1,5 a 3,0 x 10⁵ toneladas de lodo por ano (BREDA et al., 2020). Nos últimos anos, a quantidade de lodo gerado pelas estações de tratamento de esgotos domésticos tem aumentado consideravelmente, o que resulta em problemas ambientais e econômicos relacionados à sua disposição (BREDA et al., 2020).

Portando, considerando as condições econômicas brasileiras, a melhor estratégia para disposição de lodo de esgoto doméstico seria seu uso na agricultura, tendo em visto que os solos brasileiros são caracterizados por acidez elevada, baixa fertilidade, baixa concentração de matéria orgânica e alta fixação de fósforo (BREDA et al., 2020). Somado a isto, há a grande relevância do agronegócio no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, que em 2020 registrou uma participação de 26,6%, segundo dados da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), o que automaticamente está relacionado à um maior consumo de fertilizantes.

A aplicação de lodo de sistemas de tratamentos de esgotos é uma alternativa interessante para atender as demandas nutricionais de cultivos, tendo em vista que este resíduo possui uma composição com altas concentrações de nutrientes, tais como fósforo (P), nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S), podendo assim substituir parcialmente o uso de substâncias químicas (DHANKER et al., 2021). Ainda, auxilia a mitigar os efeitos negativos de disposições inadequadas (AMORIM JUNIOR et al., 2021a). Segundo Andreoli et al (1999), a prática da reciclagem agrícola se destaca como opção mais adequada não apenas por reduzir a pressão sobre a exploração dos recursos naturais, mas também por

evitar opções menos adequadas e mais impactantes para as pessoas e meio ambiente, além de promover resultados econômicos melhores. Portanto, o reuso de lodo torna-se uma alternativa que promove a produção mais limpa e a economia circular, beneficiando o solo que deixa de sofrer com condições de elevada acidez e transformando o lodo em um valorizado produto agrônomico (AMORIM JÚNIOR et al., 2021).

Embora o reuso do lodo de esgoto na agricultura seja reconhecido em todo o mundo, algumas questões relativas à sua qualidade e impacto na saúde humana devem ser consideradas, como a presença de organismos patogênicos (KRZYZANOWSKI et al., 2016), além de metais e outros possíveis contaminantes. Neste cenário destacam-se as normativas responsáveis por garantir um reciclo agrícola seguro. No Brasil, existem duas resoluções que realizam o trabalho de regular a reciclagem para fins agrícolas deste resíduo. São elas a Resolução CONAMA 375/2006 e a mais recente, Resolução CONAMA 498/2020.

Tendo em vista tal cenário, este trabalho irá abordar uma análise do risco microbiológico da aplicação do lodo gerados nas Estações de Tratamento de Esgoto em produções agrícolas, aplicando os limites de concentrações de patógenos das Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020. Por fim, serão apresentados estudos de casos onde houve a confirmação do potencial de reuso deste resíduo.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade do reuso do lodo em cultivos agrícolas através da Análise Quantitativa de Risco Microbiológico, aplicando as concentrações impostas pelas Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar o risco microbiológico do reuso do lodo em atividades agrícolas e no consumo de alimentos produzidos em solo com aplicação de lodo, segundo as resoluções que regulam o reciclo do lodo;
- Apresentar estudos de casos com potencial reciclo de lodo na agricultura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

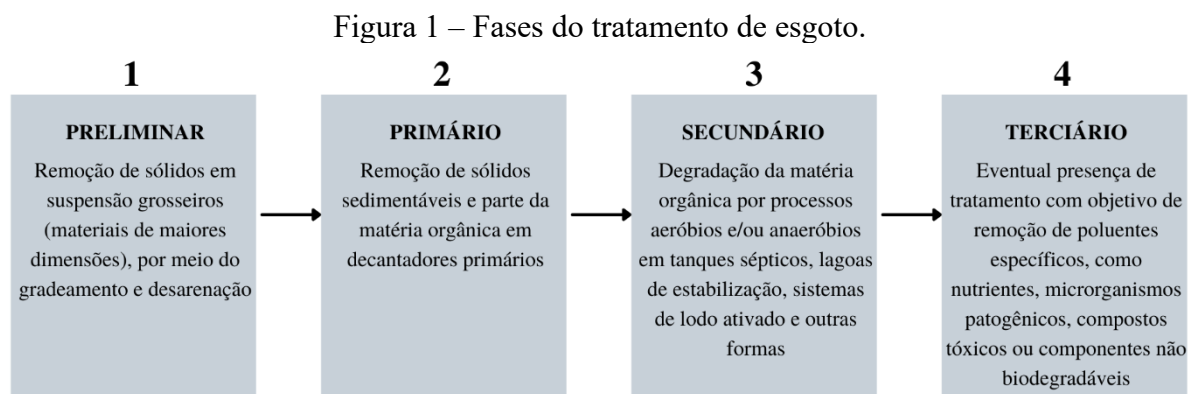
2.1 ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A água, ao ser utilizada em diversas atividades, torna-se imprópria para o consumo. Assim, ela deve ser coletada e transportada, por meio de tubulações, até locais onde sejam aplicados determinados processos que a torne adequada para retornar ao meio ambiente. Estes locais são chamados de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE).

Segundo a NBR 12209/2011, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), uma ETE consiste em um conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades cuja finalidade é a redução das cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual resultante do tratamento.

A escolha do tipo de tratamento, e conseqüentemente, da configuração das unidades de uma ETE, deve levar em consideração características como topografia da região onde será localizada, proximidade do corpo receptor e vazão e caracterização do afluente a ser tratado. Além disso, de forma geral, o processo de tratamento de esgoto deve ser concebido de forma a adequá-lo à capacidade de diluição do corpo receptor, de modo a remover a matéria orgânica e demais poluentes (ANDREOLI *et al.*, 1999), assegurando a proteção aos ecossistemas aquáticos e a preservação dos usos múltiplos da água.

O tratamento dos esgotos sanitários pode ser exemplificado em quatro fases, sendo elas: preliminar; primário; secundário ou biológico e terciário. A Figura 1, a seguir, explica de forma sucinta, estas fases.

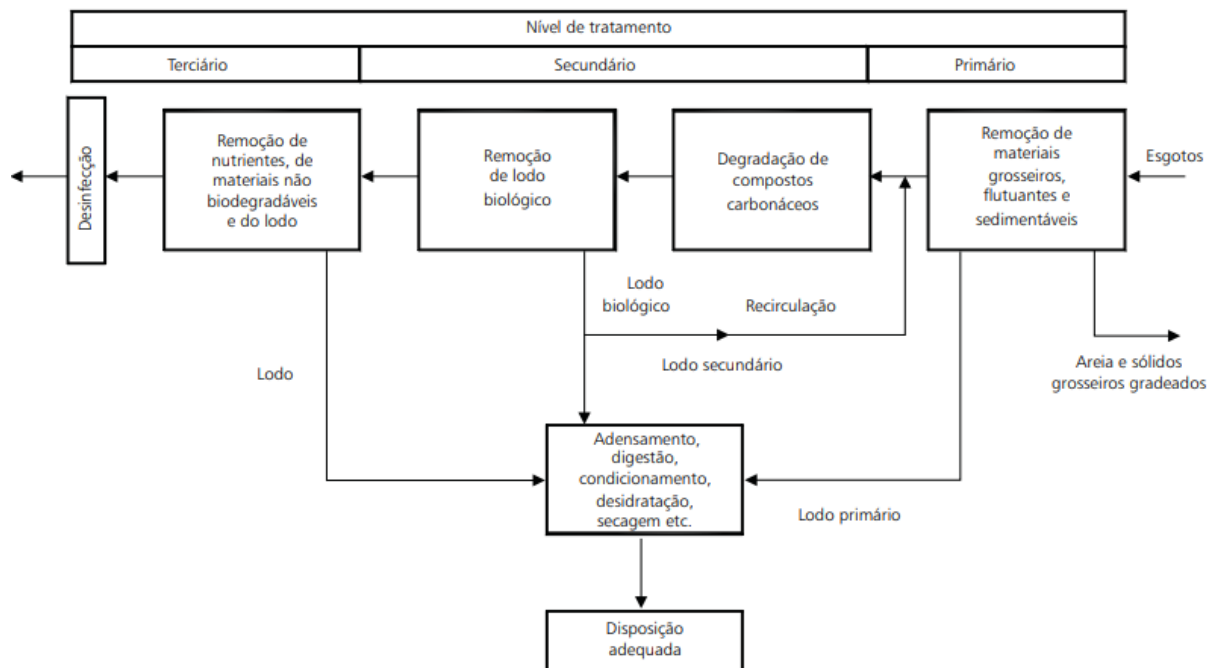


Fonte: SNIS (2021).

As fases de tratamento preliminar e primário são responsáveis pela remoção de sólidos grosseiros através da instalação de grades, pela sedimentação utilizando caixas de areia e decantadores ou pela flotação, em caso de partículas em suspensão. Estas etapas do tratamento são responsáveis por produzir uma quantidade de sólidos, o lodo primário, que devem ser dispostos de forma adequada. Em seguida, o esgoto segue para o nível de tratamento secundário, onde será realizada a degradação biológica de compostos carbonáceos, por meio de processos anaeróbios e/ou aeróbios. Em termos de geração de lodo, parte dele deve ser destinada à unidades de tratamento final e outra parte pode ser recirculada, proporcionando o retorno da massa de bactérias ativas de volta ao reator biológico, o que permite um aumento na produtividade do sistema e maior estabilidade quanto ao seu desempenho (CAMPOS et al., 1999). Determinadas situações requerem que haja um tratamento terciário na estação, sendo este responsável pela redução das concentrações de nitrogênio e fósforo, além da desinfecção do afluente líquido. Este nível de tratamento também produz lodo.

A Figura 2 abaixo apresenta, de forma esquematizada, a função de cada um dos níveis de tratamento de uma ETE, com detalhamento para a produção de lodo em cada um destes níveis.

Figura 2 – Detalhamento de um sistema convencional por nível de tratamento e geração de lodo.



Fonte: PROSAB (1999).

Desta forma, fica evidente que a escolha do tratamento a ser aplicado, dentre outras especificidades, deve estar diretamente relacionado com as políticas de gestão da destinação do lodo, uma vez que vão determinar se haverá uma maior ou menor produção de lodo. As alternativas que apontam para produções menores são os sistemas anaeróbios e lagoas (ANDREOLI *et al.*, 1999).

2.2 LODO DE ESGOTO

A NBR 12.209/2011 define lodo como uma suspensão aquosa de componentes minerais e orgânicos separados durante o sistema de tratamento. Segundo a mesma norma, pode-se ainda classificar o lodo a depender do processo o qual ele foi submetido:

- Lodo primário: também chamado de lodo cru ou bruto, é o resultado da remoção dos sólidos em suspensão do esgoto afluente à ETE, decorrente da operação do nível primário de tratamento;
- Lodo biológico: conhecido também como lodo secundário, produzido durante o processo de tratamento biológico (nível secundário de tratamento);
- Lodo adensado: é o lodo resultante do processo de adensamento, que consiste no aumento da concentração de sólidos em suspensão, tornando-o adequado a ser submetido ao desaguamento ou desidratação;
- Lodo desaguado: é o resultado da aplicação de processos de desidratação ou desaguamento. Pode ser chamado também de lodo desidratado.

A quantidade de lodo produzido em um sistema de tratamento relaciona-se diretamente aos teores de sólidos e água presentes do esgoto, segundo Andreoli et al. (1999). Ainda, a produção de lodo varia de acordo com o método de tratamento aplicado. A Tabela 1 a seguir apresenta o quantitativo de lodo produzido de acordo com o tipo de tratamento aplicado.

Tabela 1- Produção de lodo de esgoto em diferentes sistemas de tratamento.

TIPO DE TRATAMENTO	QUANTIDADE DE LODO PRODUZIDA (m ³ /hab.ano)
Lagoa facultativa primária	0,037
Lagoa facultativa	0,03 - 0,08
Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa	0,01 - 0,04
Lagoa aerada facultativa	0,03 - 0,08
Lodos ativados convencionais	1,1 - 1,5
Lodos ativados (aeração prolongada)	0,7 - 1,2
Lodos ativados (fluxo intermitente)	0,7 - 1,5
Filtro biológico (baixa carga)	0,4 - 0,6
Filtro biológico (alta carga)	1,1 - 1,5
UASB	0,07 - 0,1
Fossa séptica - filtro anaeróbio	0,07 - 0,1

Fonte: Adaptado de Andreoli *et al.* (1999).

A geração de lodo, independente do tratamento, é uma certeza. Determinados processos serão responsáveis por uma produção maior; outros serão eficientes na redução do seu volume. Entretanto, tendo em vista que este será um resíduo final do sistema operacional, é preciso pensar nas etapas subsequentes para o tratamento dele. No mundo, os processos de tratamento de lodo consistem em etapas de adensamento, desidratação e estabilização, com variações nas ordens das etapas. No Brasil, usualmente são aplicados tratamentos biológicos aeróbios e anaeróbios para reduzir a biomassa do lodo, enquanto a calagem é utilizada para reduzir a presença de metais pesados e patógenos (BREDA *et al.*, 2020).

A importância da gestão do lodo nos sistemas de tratamento foi reconhecida pela Agenda 21, a qual definiu algumas orientações para esta prática, tais como redução na produção; aumento nas possibilidades de reuso e reciclagem e a escolha de um tratamento e disposição final ambientalmente correto (ANDREOLI *et al.*, 2007). Comumente a disposição final do lodo é negligenciada durante a concepção e dimensionamento dos sistemas de tratamento de esgoto. Entretanto, isto não deveria ocorrer, visto que o custo operacional da gestão final do lodo representa uma parcela considerável do custo de operação das ETEs. Em suma, um sistema de gerenciamento e disposição final do lodo deveria ser considerado como parte do sistema de tratamento.

2.2.1 Caracterização do Lodo

Segundo Andreoli et al. (2007), as características do lodo, de forma geral, são definidas de acordo com os níveis de tratamento o qual o esgoto afluyente é submetido. Quando direcionado aos processos de desidratação, por exemplo, ocorre um aumento na concentração de sólidos totais (sólidos secos) e a redução do volume do lodo; já processos de digestão proporcionam uma diminuição na carga de sólidos totais e consequente redução de sólidos suspensos voláteis.

A Tabela 2 a seguir apresenta as características do lodo segundo o sistema de tratamento que ele foi produzido.

Tabela 2 – Caracterização e quantificação da produção de lodo segundo o tipo de tratamento do esgoto.

SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO	kg SS/kg DQO	SÓLIDOS SECOS (%)	VOLUME DE LODO (L/habitante.dia)
Tratamento primário (convencional)	0,35 - 0,45	2,0 - 6,0	0,6 - 2,2
Lagoa facultativa	0,12 - 0,32	5,0 - 15,0	0,1 - 0,25
Lagoa anaeróbia - Lagoa facultativa	0,26 - 0,55	-	0,15 - 0,45
Lagoa facultativa aerada	0,08 - 0,13	6,0 - 10,0	0,08 - 0,22
Tanque séptico + filtro anaeróbio	0,27 - 0,39	1,4 - 5,4	0,5 - 2,8
Lodo ativado convencional	0,6 - 0,8	1,0 - 2,0	3,1 - 8,2
Lodo ativado - aeração prolongada	0,5 - 0,55	0,8 - 1,2	3,3 - 5,6
Reator UASB	0,12 - 0,18	3,0 - 6,0	0,2 - 0,6
Reator UASB + pós tratamento aeróbio	0,20 - 0,32	3,0 - 4,0	0,5 - 1,1

Fonte: Adaptado de Andreoli *et al.* (2007).

2.2.2 Alternativas de Disposição Final

A crescente demanda por sistemas de tratamento de esgoto têm levado ao aumento da produção de lodo. Com a finalidade de gerir este resíduo, diversas alternativas são utilizadas, como a destinação à aterros sanitários, incineração, *landfarming*, digestão anaeróbia, compostagem e reciclo agrícola.

Os aterros sanitários são alternativas de disposição final do lodo onde este é confinado em células e recoberto com terra, e devido à ausência de oxigênio, ocorre a biodegradação anaeróbia da matéria orgânica e a produção de metano. Esta opção necessita de estudos cuidadosos de implantação e dispositivos de controle ambiental avançados. A produção de

percolados nos aterros, tanto devido ao excesso de água no próprio lodo quanto à infiltração da água da chuva, deve ser monitorada, de tal forma a evitar que este subproduto atinja e contamine o lençol freático ou as águas superficiais. Outro ponto de atenção são os gases formados como resultado da biodegradação que devem ser drenados, para posterior queima ou aproveitamento energético (ANDREOLI *et al.*, 1999). Estima-se que grande parte do lodo gerado no Brasil é destinado a aterros sanitários, o que representa custos elevados para os sistemas de tratamento (AMORIM JUNIOR *et al.*, 2021a).

Outro método de disposição final para o lodo é a incineração. O princípio desta alternativa é a decomposição térmica via oxidação, gerando um resíduo menos volumoso e tóxico (ANDREOLI *et al.*, 1999).

O chamado *landfarming*, por sua vez, consiste em uma técnica que usa o solo como um sistema de tratamento. Ao receber as doses elevadas de lodo, esta alternativa utiliza o solo como suporte para atividade biológica, retenção de metais, local de exposição ao sol e biooxidação, promovendo a degradação da matéria orgânica, sem interesse no aproveitamento dos nutrientes presentes no lodo (ANDREOLI *et al.*, 1999).

A digestão anaeróbia é um método de estabilização de lodo, especialmente aplicado em ETEs que utilizam sistemas de lodo ativado. Em suma, o processo consiste na solubilização e redução de substâncias orgânicas complexas através da ação de microrganismos na ausência de oxigênio. O resultado final é um lodo estabilizado e a produção de metano, dióxido de carbono, dentro outros gases (ANDREOLI, 2001). A digestão anaeróbia mostra-se como uma medida eficiente quanto à eliminação de mau odor; contudo, não apresenta eficiência significativa para a redução de patógenos, implicante em limitações quanto ao reuso do lodo por questões de segurança sanitária.

O processo de compostagem é uma outra alternativa de estabilização do lodo, definida como a biooxidação aeróbia exotérmica de um substrato orgânico heterogêneo, que resulta na produção de CO₂, água, liberação de substâncias minerais e formação de matéria orgânica estável. Sua grande diferença para os demais métodos de estabilização é que ocorre em meio sólido (ANDREOLI, 2001). Um processo de compostagem eficiente depende de parâmetros físico-químicos que proporcionem aos microrganismos condições favoráveis para se desenvolverem e transformarem a matéria orgânica. Estes parâmetros são: aeração, temperatura, umidade, relação C/N, granulometria (estrutura do lodo) e pH.

2.2.2.1 Aplicação na Agricultura

Seguindo um ponto de vista com enfoque sustentável, é necessário buscar uma alternativa de disposição final do lodo que, além de destiná-lo corretamente, usufrua do potencial que ele pode oferecer. Assim, devido à sua alta concentração de matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e micronutrientes, o lodo pode ser aplicado em produções agrícolas, agregando valor a este resíduo diante das suas características fertilizantes (PEREIRA et al., 2020). Esta opção alia baixo custo e é, ambientalmente, a solução mais correta, uma vez que promove o retorno dos nutrientes ao solo (ANDREOLI *et al.*, 1999).

Na Europa, a utilização de lodo na agricultura consiste em uma das opções mais populares de disposição final, apresentando benefícios a longo prazo do ponto de vista ambiental e econômico, tornando-o assim uma alternativa competitiva (SCHMIDT et al., 2006).

No Brasil, o uso do lodo como fertilizante agrícola melhorou a fertilidade do solo, a atividade biológica e a produtividade dos cultivos, o que está relacionado à presença de matéria orgânica e nutrientes benéficos para as plantas, especialmente nitrogênio e fósforo (BREDA et al., 2020). Devido à necessidade de reposição de matéria orgânica dos solos em virtude do intenso intemperismo causado pelas condições climáticas, esta é uma alternativa particularmente promissora para o país (ANDREOLI *et al.*, 1999). A aplicação do lodo para reuso agrícola demonstra que há uma rápida mudança nas condições físico-químicas do solo, proporcionando um rápido e equilibrado fornecimento de nutrientes para as plantas. Ainda, há resultados atraentes quanto ao uso de lodo em solos degradados, devido a fatores como:

- Correção do pH ácido dos solos degradados pela calagem do lodo, promovendo a neutralização do solo;
- Fornecimento da forma orgânica de nitrogênio e fósforo;
- Incorporação de matéria orgânica que condiciona os solos degradados, modificando positivamente a sua estrutura e facilitando a penetração tanto da água como das raízes.

Os nutrientes a serem ofertados por meio do lodo serão diretamente dependentes da qualidade do esgoto afluente, além do tipo de tratamento utilizado. A Tabela 3 a seguir apresenta alguns dos constituintes encontrados em diversos sistemas de tratamento de esgoto no Brasil. Nela é possível notar que nitrogênio e fósforo são encontrados em quantidades consideráveis, enquanto que potássio, cálcio e magnésio se apresentam em quantidades menores.

Tabela 3 – Constituintes do lodo de alguns sistemas de tratamento de esgoto no Brasil (em % de matéria seca).

Localidade	Tipo de lodo	N	P	K	C. orgânico	Ca	Mg	Fonte
Barueri - SP	Lodo ativado	2,25	1,48	0,01	21,00	7,29	-	Tsutya (2000)
Franca - SP	Lodo ativado	9,15	1,81	0,35	34,00	2,13	-	Tsutya (2000)
Belém - PR	Lodo ativado	4,19	3,70	0,36	32,10	1,59	0,60	Sanepar (1997)
UASB - PR	Lodo anaeróbio	2,22	0,67	0,95	20,10	0,83	0,30	Sanepar (1997)
Sul - DF	Lodo ativado	5,35	1,70	0,18	34,70	2,68	0,41	Silva et al. (2000)
Eldorado - ES	Lagoa anaeróbia	2,00	0,20	0,04	-	-	-	Muller (1998)
Mata da Serra - ES	Lagoa facultativa	2,00	0,20	0,05	-	-	-	Muller (1998)
Valparaíso - ES	Lagoa de sedimentação	4,00	3,50	0,07	-	-	-	Muller (1998)

Fonte: Andreoli *et al.* (2007).

Andreoli *et al.* (2007) aborda que quando a aplicação de lodo consiste na única fonte de nitrogênio para as plantas, está será suficiente para suprir a necessidade de micronutrientes. Por este motivo, é importante salientar que a aplicação de quantidades excessivas pode gerar efeitos tóxicos às culturas agrícolas, uma vez que as quantidades de micronutrientes são pequenas. Ainda sobre as necessidades dos cultivos, usualmente há a necessidade de suplementação de determinados compostos orgânicos ou inorgânicos para garantir um bom desenvolvimento das plantas. Em geral, devido à sua alta demanda em determinados solos, o fósforo precisa ser suplementado, bem como o potássio, pois como visto anteriormente, se apresenta em concentrações baixas. Apesar disto, é importante ter especial atenção quanto às aplicações de fósforo no solo, uma vez que este apresenta pequena mobilidade, quando por exemplo comparado ao nitrato, e desta forma sua perda por percolação é considerada insignificante (KLEIN *et al.*, 2012).

Relativo ao seu potencial de aplicação, esta alternativa de disposição final para o lodo é aceitável desde que sejam evitados os impactos negativos para o solo, produtos agrícolas, meio ambiente e saúde humana. No que diz respeito à contaminação causada por organismos patogênicos, há uma série de tecnologias capazes de reduzir tais constituintes à níveis aceitáveis para o reuso agrícola do lodo (ANDREOLI *et al.*, 2007). Para metais e poluentes orgânicos, a prevenção ainda é a melhor estratégia, uma vez que alternativas para a remoção destes não se apresentam viáveis, especialmente para países em desenvolvimento.

Por fim, vale enfatizar que as regulamentações de uso do lodo como insumo agrícola asseguram a proteção à saúde humana e animal, a qualidade dos cultivos, do solo e do meio ambiente. Isto pode ser visto nos diversos estudos científicos públicos sobre a reciclagem

agrícola, que demonstram nenhum efeito adverso do uso controlado deste insumo (ANDREOLI *et al.*, 1999).

2.3 LEGISLAÇÃO PARA REUSO DO LODO

A seguir, são apresentadas as duas resoluções existentes no Brasil para regulação do reciclo de lodo para fins agrícolas.

2.3.1 Resolução CONAMA 375/2006

A Resolução CONAMA 375 de 29 de agosto de 2006 estabelece critérios e procedimentos para o uso, em áreas agrícolas, de lodo de esgoto proveniente de estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, com a finalidade de oferecer benefícios à agricultura e evitar risco à saúde pública e ao ambiente. A normativa esclarece que o reuso de lodos de ETEs para finalidades agrícolas depende da aplicação de processos de redução de patógenos e da atratividade de vetores, conforme apresentado pelo Anexo I da resolução. Ainda, aponta que o determinado pela resolução não é aplicável à lodos de estações de tratamento de efluentes de processos industriais e que a utilização agrícola é vetada também para: lodos de estações de tratamento de efluentes de instalações hospitalares, de portos e aeroportos; resíduos do gradeamento; resíduos do desarenador; material lipídico sobrenadante de decantadores primários, de caixas de gordura e reatores anaeróbios; lodos coletados de sistemas de tratamento individual coletados por veículos e antes de serem submetidos à tratamentos em ETEs; lodo não estabilizado; lodos classificados como perigosos de acordo com normas brasileiras vigentes.

O lodo a ser aplicado, segundo a CONAMA 375/2006 deve passar por processo de caracterização, incluindo os seguintes aspectos: potencial agrônômico; substâncias inorgânicas e orgânicas potencialmente tóxicas; indicadores bacteriológicos e agentes patogênicos e estabilidade. Quanto à presença de patogênicos e indicadores bacteriológicos, devem ser determinadas as concentrações de coliformes termotolerantes, ovos viáveis de helmintos, *Salmonella* e vírus entéricos.

A aplicação de lodo de esgoto e seus derivados pode ocorrer somente, conforme especificado pela resolução, com a existência de uma Unidade de Gerenciamento de Lodo

(UGL), cujo licenciamento deve prever mecanismos de prestação de informações à população local acerca do lodo ali gerenciado.

Quanto aos requisitos mínimos de qualidade do lodo, a resolução estabelece limites máximos para substâncias inorgânicas e para agentes patogênicos, sendo que para este último, o lodo é tratado separadamente por meio de duas classes. A Tabela 4 a seguir apresenta as classes do lodo e seus respectivos limites de concentração dos patógenos.

Tabela 4 – Concentrações máximas de patógenos, conforme classe de lodo, pela Resolução CONAMA 375/2006.

Tipo de lodo ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes termotolerantes $<10^3$ NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos $<0,25$ ovo/g de ST Salmonela ausência em 10g de ST Vírus $<0,25$ UFP ou UFF/g de ST
B	Coliformes termotolerantes $< 10^6$ NMP/g de ST Ovos viáveis de helmintos <10 ovo/g de ST

Fonte: Brasil (2006).

No que diz respeito às culturas aptas a receberem o lodo e seus derivados, a resolução esclarece que é proibida a utilização de qualquer tipo de classe de lodo em áreas de pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos, raízes e culturas inundadas, além de demais culturas onde a parte comestível tenha contato com o solo. Em locais onde houver aplicação de lodo ou derivados, as pastagens podem ser implantadas desde que haja um intervalo mínimo de 24 meses desde a última aplicação. Para o cultivo de olerícolas, tubérculos, raízes e demais culturas que a parte comestível tenha contato com o solo, este intervalo deve ser de no mínimo 48 meses. Para os lodos classificados como A, a aplicação pode ser realizada para quaisquer culturas, desde que se respeite as restrições acima apresentadas e àqueles referentes às restrições locais, conforme art. 15. Para lodos classe B, sua utilização é restrita ao cultivo de café, silvicultura, culturas para produção de fibras e óleos, com aplicação de forma mecanizada, em sulcos ou covas e seguidas de incorporação e respeitando as restrições locais à aquelas quanto ao acesso público, conforme inciso XI do art. 18 da resolução.

O art. 14 da resolução apresenta as restrições locais. Sendo assim, não é permitida a aplicação de lodo em: unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção

Ambiental – APA; Áreas de Preservação Permanente – APP; Áreas de Preservação de Mananciais – APM; em raio mínimo de 100m de poços rasos e residências, dentre outros.

Na sequência, a resolução aborda ainda a obrigatoriedade de elaboração de projeto agrônomo por profissional qualificado; taxas de aplicação máxima em base seca e recomendações, por responsabilidade da UGL, quanto ao manuseio e aplicação do lodo; diretrizes acerca de carregamento, transporte e estocagem; orientações para o monitoramento das áreas onde houve a aplicação do lodo ou seus derivados e por fim, as responsabilidades dos envolvidos neste processo.

2.3.2 Resolução CONAMA 498/2020

A resolução mais recente para regulamentação do reciclo agrícola de lodo é a Resolução CONAMA 498, de 19 de agosto de 2020. Seu escopo é definir critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos. Neste caso, biossólido são compreendidos como o produto do tratamento de lodo de esgoto que atende aos critérios microbiológicos e químicos estabelecidos pela resolução, e, portanto, é apto à aplicação no solo.

A primeira diferença em relação à resolução apresentada no tópico anterior refere-se ao uso de lodo de estações de tratamento de efluentes de processos industriais. A Resolução CONAMA 498/2020 estabelece que este resíduo poderá ser usado excepcionalmente quando autorizado pelo órgão ambiental competente. Permanecem os demais vetos quanto a origem de lodo, conforme Resolução 375/2006.

Assim como na resolução anterior, neste também fica proibido o uso e incorporação de resíduos grosseiros e material flutuante. É semelhante também os aspectos exigidos para a caracterização do lodo.

Quanto à classificação do lodo, a Resolução CONAMA 498/2020 classifica o lodo em classe A e B, conforme características expostas na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5 – Classes A e B de lodo, segundo a Resolução CONAMA 498/2020, e seus requisitos de classificação.

Classificação do lodo	Requisitos
A	- Limite máximo de <i>Escherichia Coli</i> de 10^3 NMP/g de ST - Ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos conforme descrito na Tabela 1 da Resolução
B	- Limite máximo de <i>Escherichia Coli</i> de 10^6 NMP/g de ST - Ser proveniente de um dos processos de redução de patógenos conforme descrito na Tabela 2 da Resolução

ST: sólidos totais

Fonte: Brasil (2020).

Esta resolução aborda mais uma classificação, em lodos classe 1 ou 2, conforme valores máximos permitidos para as substâncias químicas, diferentemente da resolução 375/2006, onde não havia esta segunda classificação.

A Resolução CONAMA 498/2020 define ainda que, para o reuso em solo, o lodo deve atender a pelo menos um dos critérios apresentados para redução de atratividade de vetores, sendo eles: digestão anaeróbia; digestão aeróbia; compostagem; estabilização química; secagem, dentre outros.

Quanto as restrições de uso, os lodos classificados como classe A podem ser aplicados em solos nos usos apresentados na Tabela 6 abaixo. Também são apresentadas, na mesma tabela, as restrições de aplicação.

Tabela 6 – Usos permitidos e respectivas restrições para lodos classe A.

Uso	Restrição
Cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível não tenha contato com o solo	Não aplicar o biossólido 1 mês antes do período de colheita
Pastagens e forrageiras	Não aplicar o biossólido 1 mês antes do período de colheita de forrageiras e do pastejo

Fonte: Brasil (2020).

Não são definidas restrições quanto ao intervalo de aplicação de lodos classe A e as colheitas nas seguintes situações: produtos alimentícios que não têm contato com solo; produtos alimentícios que não são consumidos crus; produtos não alimentícios.

Por sua vez, a aplicação de lodos classe B é proibida para o cultivo de alimentos que possam ser consumidos crus. Entretanto, não há restrições para a sua aplicação em florestas plantadas, recuperação de solos e de áreas degradadas. Os usos permitidos e as respectivas restrições para lodos classe B são apresentados na Tabela 7 a seguir.

Tabela 7 – Usos permitidos e respectivas restrições para lodos classe B.

Uso	Restrição
Cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus e produtos não alimentícios	Não aplicar o biossólido 4 meses antes do período de colheita
Pastagens e forrageiras	Não aplicar o biossólido 2 meses antes do pastejo Não aplicar o biossólido 4 meses antes do período de colheita de forrageiras
Árvores frutíferas	Aplicação deve ser realizada após a colheita

Fonte: Brasil (2020).

Ainda quanto ao uso, não há restrição de aplicação de lodo, para quaisquer classes e em quaisquer culturas, para fins de pesquisa ou uso do solo para cultivo de cortinas verdes, jardins e gramados em áreas de ETEs e UGLs.

As demais seções apresentadas na Resolução se assemelham à resolução anterior. São expostas orientações e informações sobre recomendações técnicas e condições de uso do lodo nos solos; as doses de aplicação; procedimentos de carregamento, transporte e estocagem; questões sobre monitoramento e, finalmente, as responsabilidades.

2.4 LIMITAÇÕES PARA REUSO DO LODO

Apesar do lodo apresentar características de fertilizantes, devido à presença de diversos constituintes orgânicos e minerais, a presença de outros componentes pode não ser desejável quando associado aos possíveis riscos ambientais e sanitários (ANDREOLI *et al.*, 2007).

O uso do lodo de esgoto nas culturas agrícolas leva à preocupação quanto à contaminação do solo, da água e dos organismos presentes, em razão da potencial presença de

microrganismos patogênicos, metais pesados e compostos orgânicos sintéticos (PEREIRA et al., 2020). Tal preocupação se dá pelo fato de tanto os metais pesados quanto os agentes patogênicos, tenderem a co-precipitar com o esgoto e se concentrarem na massa de lodo (ANDREOLI *et al.*, 1999). Todavia, a presença destes compostos é extremamente variável e dependente tanto das características do esgoto afluyente quanto do tipo de sistema de tratamento a ser utilizado.

Contudo, apesar deste ponto de atenção, as mudanças indesejáveis que podem ocorrer no solo com a aplicação do lodo dependem do tipo de solo bem como das características físico-químicas do lodo, da sua concentração e frequência de aplicação. Por isto, previamente à aplicação deste resíduo nos cultivos, é necessário avaliar seu impacto no solo e nos microrganismos presentes (DHANKER et al., 2021).

Desta maneira, companhias de saneamento cujo propósito esteja alinhado com a valorização do lodo como um subproduto passível de reciclagem, devem prever uma política ambiental sustentável para isto e que determine a melhor qualidade de lodo, em termos econômicos e alcançáveis (ANDREOLI et al., 2007). Não menos relevante, estas companhias devem assegurar que as águas residuárias de origem não doméstica não promovam a contaminação do lodo e uma possível necessidade de investimento em tecnologias mais caras para o tratamento.

2.4.1 Riscos associados ao uso de lodo

A presença de metais pesados pode ocasionar uma contaminação do solo e água, causando efeitos adversos no crescimento das plantas e dos microrganismos (BREDA et al., 2020). A origem dos metais pesados no lodo pode se dar por, basicamente, três origens: rejeitos domésticos; águas pluviais que carregam resíduos de metais pesados dispersos na fumaça dos veículos; efluentes industriais, sendo esta a principal fonte (ANDREOLI *et al.*, 1999). Embora a presença de metais mostre-se prejudicial em grandes quantidades, pequenas quantidades podem acumular-se no solo após seguidas aplicações, ocasionando efeitos indesejáveis para microrganismos, plantas e animais (AMORIM JUNIOR et al., 2021a). Entretanto, do ponto de vista do reuso agrícola, há estudo que defendam a reciclagem do lodo baseados nas evidências de que, de forma geral, a concentração de metais no lodo é menor que nos fertilizantes utilizados na agricultura.

Outra potencial contaminação é a presença de microplásticos, os quais são conhecidos por acumular e transferir ao meio ambiente substâncias tóxicas. Apesar disto, a Resolução CONAMA 375/2006 não expressa limites para os microplásticos na utilização do lodo em produções agrícolas (BREDA et al., 2020).

Outro aspecto importante no que se refere aos riscos da utilização do lodo é quanto a sanidade, ou seja, a presença de patógenos no lodo. A existência de microrganismos patogênicos nos lodos é indesejada não somente pelos riscos promovidos às pessoas que os manipulam, mas também pela sua resistência em sobreviver após a aplicação do lodo nas culturas. Segundo Andreoli *et al* (1999), a sanidade do lodo está intrinsicamente relacionada com perfil da saúde da população e a sua influência nas condições sanitárias varia conforme o organismo e as condições ambientais. Dentre os patógenos mais importantes, ressaltam-se os estreptococos, *Salmonella* sp, *Shigella* sp., larvas e ovos de helmintos, protozoários (cistos) e vírus (enterovírus e rotavírus). Ainda, segundo Andreoli *et al.* (2007), esgotos provenientes de populações com estilo de vida mais saudável apresentam uma quantidade substancialmente menor de patógenos do que àquelas com culturas menos saudáveis.

Apesar dos agentes patógenos constituírem, de forma geral, o fator limitante para o uso de lodo na agricultura, tal elemento pode ser facilmente controlado com a adoção de soluções de higienização eficientes, a fim de eliminar o patógeno, como a calagem e a compostagem.

Quanto ao uso sucessivo, não há estudos que comprovem o risco ambiental de tal atividade quando realizada com certa frequência. A hipótese existente é que sucessivas aplicações de lodo para cultivos agrícolas promove a acumulação de nutrientes e o risco de lixiviação de nitrogênio para fontes de água (BREDA et al., 2020). O nitrogênio presente na forma de nitrato tem como característica sua alta mobilidade no solo, o que pode fazê-lo atingir facilmente fontes de águas subterrâneas e torna-las impróprias ao consumo humano (ANDREOLI et al., 1999).

2.5 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO

A Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM) consiste em um modelo probabilístico que integra dados sobre a abundância de patógenos, a exposição humana e infecção para avaliar possíveis impactos à saúde relacionados à um ambiente contaminado

(DEEPNARAIN et al., 2020). Seu uso fornece uma comparação e avaliação de diversas situações baseadas em quesitos relacionados à saúde.

O fluxograma de desenvolvimento de uma AQRM é composto pelas seguintes etapas: descrição do perigo, avaliação da exposição, modelo dose-resposta, caracterização do risco e gestão do risco.

2.5.1 Descrição do perigo

A descrição do perigo constitui o primeiro passo de uma AQRM e é onde são definidos o escopo e o propósito da avaliação de risco (PETTERSON *et al.*, 2016). Nesta etapa, são identificados os potenciais agentes microbiológicos e os efeitos negativos que podem decorrer da atuação destes agentes na saúde humana (KNIHS, 2019). Para tanto, é preciso contar com uma equipe formada por diversos profissionais, a fim de assegurar uma avaliação de risco robusta o suficiente para ser utilizada como em uma tomada de decisão.

2.5.2 Avaliação da exposição

Segundo Petterson et al. (2016), o objetivo dessa etapa da avaliação é determinar a frequência e a magnitude da exposição dos patógenos. Aqui, há a necessidade, primeiramente, de conhecer a informação do ponto de vista quantitativo; em outras palavras, a concentração do patógeno que será avaliado. Em segundo lugar, é necessário esclarecer as especificações da exposição humana, tais como o tamanho da população que será exposta; a natureza desta população e a forma e frequência da exposição. Os dados apresentados nesta etapa da avaliação definem cenários de exposição, graus de contato e frequência de diferentes exposições (KNIHS, 2019).

A dose é definida como uma combinação da concentração (quantidade por unidade de volume) de microrganismos presentes em determinado meio ou produto (como a água solo, ar ou alimentos) com o volume ingerido ou inalado durante a exposição (SANTOS, 2019). A dose pode ser obtida segundo a Equação 1 a seguir.

$$D = C . V \quad \text{Equação 1}$$

Onde

D: dose ingerida de patógenos durante cada evento de exposição;

C: concentração de microrganismos no meio ou produto a qual a população analisada está exposta;

V: volume ingerido ou inalado por evento de exposição.

Para cada determinada dose por exposição, define-se um risco como a probabilidade de infecção associada a cada simples exposição. Este risco é calculado com base na relação dose-resposta.

2.5.3 Modelo dose-resposta

A análise da dose-resposta consiste em uma relação quantitativa entre a probabilidade de ocorrer os efeitos adversos e o nível de exposição (QRMA, 2022). Nesta etapa da avaliação é preciso selecionar um modelo que se adeque ao caso a ser avaliado segundo referências literárias existentes (PETTERSON et al., 2016). Em outras palavras, essa etapa objetiva caracterizar a relação entre várias doses administradas e os danos causados à saúde. A avaliação da relação dose-resposta caracteriza-se por uma relação matemática entre a dose e a probabilidade de infecção ou doença na população exposta (SANTOS, 2019).

Neste passo da avaliação, é preciso entender como diferentes níveis de exposição afetam a população. Por este motivo, é possível dizer que o modelo dose resposta é a fase mais importante do desenvolvimento da AQRM.

Na literatura, diversos modelos dose-resposta podem ser encontrados. Todavia, os mais utilizados são o beta-Poisson e o exponencial.

2.5.3.1 Modelo beta-Poisson

O modelo dose-resposta beta-Poisson assume que a distribuição dos organismos presentes é aleatória e caracterizada por uma distribuição Poisson. Este modelo pressupõe que a dose se comporta como uma distribuição Poisson e que a probabilidade de um organismo infectar o indivíduo se comporta como uma distribuição beta (SANTOS, 2019).

A equação geral deste modelo é apresentada a seguir, pela Equação 2.

$$P = 1 - \left[1 + dose * \frac{2^{1/\alpha-1}}{N_{50}} \right]^{-\alpha} \quad \text{Equação 2}$$

Onde

P é a probabilidade de infecção para uma única exposição;
 Dose é o número de organismos ingeridos por exposição;
 N_{50} é a dose infectante média;
 a é um parâmetro característico da interação agente-hospedeiro.

2.5.3.2 Modelo exponencial

O modelo exponencial é considerado mais simplificado e ignora a heterogeneidade que possa existir na probabilidade de um único organismo sobreviver e iniciar a infecção. Tal limitação é superada pelo modelo beta-Poisson, descrito anteriormente (SANTOS, 2019).

A equação geral do modelo exponencial é apresentada a seguir, pela Equação 3.

$$P = 1 - [\exp(-r * dose)] \quad \text{Equação 3}$$

Onde

P é a probabilidade de infecção para uma única exposição;
 Dose é o número de organismos ingeridos por exposição;
 r é um parâmetro característico da interação agente-hospedeiro.

2.5.4 Caracterização do risco

A caracterização do risco compreende uma etapa onde combina-se as informações das etapas anteriores em uma avaliação da probabilidade de ocorrência do risco analisado, bem como da gravidade dos efeitos que a exposição pode proporcionar (PETTERSON et al., 2016). É necessário esclarecer que os resultados obtidos por meio da aplicação da AQRM não apontam para números reais de ocorrência de alguma doença ou efeito adverso, mas sim para a probabilidade da existência deste risco.

3 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho se dará por duas vias: a primeira delas com a apresentação de casos práticos no Brasil que demonstrem e afirmem o potencial de reuso agrícola do lodo de esgoto. A segunda, por sua vez, apresentará o desenvolvimento da metodologia AQRM para identificar o risco de aplicar o lodo de esgoto na agricultura, em três cenários, e analisando quatro microrganismos patogênicos.

3.1 ESTUDOS DE CASO

Alguns estudos de caso que demonstraram a viabilidade e potencial de reuso na agricultura foram selecionados e apresentados de forma sucinta.

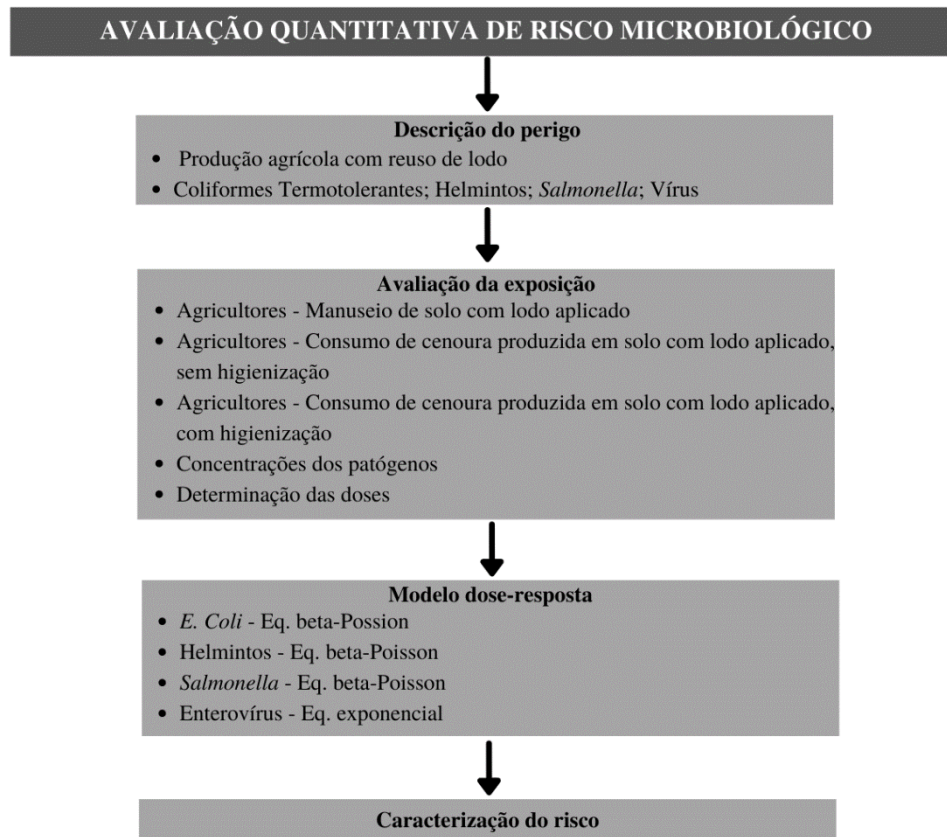
A fonte de dados utilizada para obtenção destes casos práticos foi o website Science Direct. Os artigos utilizados para apresentação de casos práticos foram encontrados em inglês, mas todos eles com experimentos realizados no Brasil. O período de busca ocorreu entre 03 de janeiro de 2022 e 08 de fevereiro de 2022. Para um resultado mais eficiente, algumas palavras-chaves foram utilizadas durante a busca, como: gestão de lodo; reciclo agrícola; qualidade do solo; presença de contaminantes.

Os critérios utilizados para a escolha dos três casos a serem apresentados foram: demonstração do potencial de reuso do lodo de esgoto na agricultura no Brasil; concordância dos resultados em relação às duas Resoluções que regulamentam o reuso de lodo para fins agrícolas; diferentes alternativas de aplicação dentro da agricultura (reuso do lodo ou utilização dele na matriz da produção de fertilizantes); demonstração de opções para tratamento do lodo que viabilize sua aplicação em cultivos agrícolas.

3.2 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO

A utilização da metodologia AQRM no presente trabalho será realizada pela aplicação de quatro etapas, as quais encontram-se descritas nos tópicos seguintes. A Figura 3 apresenta, de forma resumida, o que cada uma das etapas deve abordar.

Figura 3 – Esquema das etapas de desenvolvimento da metodologia AQRM para reuso de lodo de esgoto na agricultura.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.2.1 Descrição do perigo

A aplicação de lodo em produções agrícolas foi avaliada tendo em vista as características potenciais do lodo, que o tornam atrativo para reuso agrícola. A literatura existente aponta para possíveis riscos da sua utilização, especialmente no que diz respeito a presença de organismos patogênicos.

Os microrganismos patogênicos a serem avaliados são aqueles abordados com limites nas Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020, sendo eles: coliformes termotolerantes, helmintos, *Salmonella* e vírus.

3.2.2 Avaliação da exposição

O primeiro cenário a ser avaliado neste trabalho será do risco o qual um agricultor é exposto ao manusear o solo contendo lodo para cultivo de determinadas culturas. Neste cenário, considera-se um contexto de agricultura familiar, onde o agricultor é responsável por todas as etapas do plantio agrícola, inclusive o revolvimento do solo. Segundo Custodio et al. (2021), a taxa de ingestão de solo por um agricultor é de 0,33g/dia, sendo este o volume a ser considerado no desenvolvimento da análise de risco.

O segundo cenário a ser analisado será quanto ao risco do agricultor que manuseia o solo/lodo para a produção agrícola, e também consome o produto que foi produzido naquelas condições, sem nenhum tipo de higienização, considerando que haverá quantidades remanescentes de solo e que o alimento será ingerido cru. Será avaliada a ingestão de cenoura por esta população, cuja taxa de ingestão diária é de 56g e a quantidade de solo que permanece no alimento situa-se na faixa de 1,7 a 3,0g (KRZYZANOWSKI et al., 2016). Neste caso, foi utilizado o valor máximo de 3,0g para cálculo do risco. De acordo com a referência utilizada, não há informações se a cenoura havia sido descascada ou não. Foi preciso considerar também um peso médio de uma cenoura, que segundo a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) é de 120g. Sendo assim, o volume de ingestão diário de cenoura corresponde à 0,47% do peso médio deste vegetal. Ressalta-se que aqui foi considerado um cenário onde a ingestão ocorre em um dia diferente do dia do manuseio do solo/lodo.

Será avaliado ainda um terceiro cenário, semelhante ao segundo, em termos de volume de ingestão e população avaliada. Entretanto, será considerado que haverá uma higienização apenas com água corrente de boa qualidade, o que é capaz de proporcionar até 74% de redução da carga de patógenos nos vegetais (SANTOS, 2007).

De acordo com os cenários previamente apresentados, haverá apenas um grupo de população avaliado, correspondente aos agricultores. O que diferenciará será a via de exposição. No primeiro cenário, considera-se que a exposição ocorrerá por meio do manuseio do solo contendo lodo aplicado. Já para o segundo e terceiro cenário, a exposição se dará pela ingestão das cenouras cultivadas no solo que contém lodo aplicado.

A Tabela 8 apresenta de forma resumida os volumes considerados de acordo com a via de exposição.

Tabela 8 – Volumes de solo ingeridos conforme via de exposição e população avaliada.

População avaliada	Via de exposição	Volume ingerido de solo/lodo (g/dia)	Referência
Agricultores	Manuseio do solo/lodo	0,33	Custodio et al. (2021)
Agricultores que consomem o que plantam	Ingestão de cenouras cultivadas no solo com aplicação de lodo	1,40	Krzyzanowski et al. (2016)

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As concentrações de microrganismos a serem utilizadas para o cálculo da dose de exposição foram obtidas de duas diferentes formas. A primeira por meio da utilização dos limites impostos pelas Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020, objetivando avaliar estas resoluções do ponto de vista do risco microbiológico. A segunda forma foi aplicando concentrações encontradas em casos reais e publicadas previamente em alguns estudos. Navarro *et al.* (2008) não especifica o tipo de tratamento o qual o lodo é proveniente. Krzyzanowski *et al.* (2016) analisa o resíduo de um sistema de tratamento de lodo ativado com digestão anaeróbia do lodo. Amorim Junior *et al.* (2021), por sua vez, aborda lodo gerado de um reator UASB com posterior aplicação em leitos de secagem. A Tabela 9 abaixo resume as concentrações que serão utilizadas para cada um dos patógenos avaliados, de acordo com a referência.

Tabela 9 – Concentrações dos patógenos para cálculo do risco.

Referências	C. Termotolerantes (NMP/g de ST)	Helminhos (ovo/g de ST)	<i>Salmonella</i> (NMP/g de ST)	Vírus (UFP/g de ST)
Resolução CONAMA 375/2006	10 ³ ¹	0,25 ¹	Ausência em 10g de ST ¹	0,25 ¹
	10 ⁶ ²	10 ²	-	-
Resolução CONAMA 498/2020	10 ³ ¹	1 ¹	-	-
	10 ⁶ ²	-	-	-
Navarro et al. (2008)	-	4	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,02	-
Amorim Junior et al. (2021)	9100	<0,25	Ausência	<3,59

¹ Lodos de Classe A

² Lodos de Classe B

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Cabe ressaltar que no caso dos coliformes termotolerantes, considera-se que apenas 8% da concentração equivale à parcela de *E. Coli* patogênica (WHO, 2016). Por este motivo, ao calcular a dose, será usado esse percentual da concentração.

A partir dos valores dos volumes de solo ingeridos e das concentrações de cada um dos organismos patogênicos expostos, foi possível calcular os valores de doses, conforme Equação 1 apresentada na seção 2.5.2.

3.2.3 Modelo dose-resposta

Para cada um dos microrganismos patogênicos analisados, um modelo foi utilizado para cálculo do risco, baseando-se em estudos já desenvolvidos.

3.2.3.1 *Coliformes Termotolerantes*

Para a análise de coliformes termotolerantes, foi aplicado um modelo para o patógeno *E. Coli* O157:H7. O modelo aplicado corresponde ao beta-Poisson, conforme descrito no item 2.5.3.1. Os parâmetros para utilização deste modelo são $a = 0,155$; $N_{50} = 2,11E^{+06}$ (QMRA, 2022).

3.2.3.2 *Helmintos*

Para os helmintos, o modelo beta-Poisson foi aplicado, numa análise desenvolvida por Navarro et al. (2008) para avaliação de *Ascaris lumbricoides* para reuso de lodo de esgoto na agricultura. Os parâmetros utilizados para a equação foram $a = 0,104$; $N_{50} = 859$.

3.2.3.3 *Salmonella*

Tendo em vista que a *Salmonella* não tifoide é considerada o patógeno bacteriano mais comum por causar infecções gastrointestinais em todo o mundo (CHEN et al., 2013), este será o tipo utilizado para a análise de risco neste trabalho.

Foi considerado o modelo beta-Poisson, cujos parâmetros são $a = 2,1E^{-01}$; $N_{50} = 4,98E^{01}$ (QMRA, 2022).

3.2.3.4 *Vírus*

Para a análise de riscos quanto à presença de vírus, foi considerado o modelo para enterovírus, já que este é abordado pelas Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020 e ainda o vírus analisado por Amorim Junior et al. (2021). O modelo corresponde à equação do tipo exponencial, apresentado no item 2.5.3.2. O parâmetro k para esse modelo é no valor de $3,74 \times 10^{-3}$ (QMRA, 2022).

3.2.4 **Caracterização do risco**

Nesta etapa, os valores encontrados para as doses em ambos os cenários foram integrados nos respectivos modelos de dose-resposta, de acordo com o microrganismo patogênico que estava sendo analisado. O resultado encontrado corresponde à probabilidade de haver uma infecção nas condições avaliadas.

Os resultados obtidos nesta etapa serão apresentados no tópico 4.2 e devidamente discutidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDOS DE CASO

4.1.1 Uso agrícola e correção de pH de lodo de esgoto anaeróbio com pH ácido

O primeiro exemplo prático de reuso de lodo para fins agrícolas refere-se à um estudo desenvolvido por Pereira et al. (2020), cujo objetivo foi apresentar resultados da aplicação de lodo de esgoto de sistemas anaeróbios desinfetados por solarização em estufa para a produção de alface.

Tendo em vista a alta concentração de matéria orgânica, fósforo, nitrogênio e micronutrientes presentes no lodo de esgoto, o uso agrícola apresenta-se como uma alternativa apropriada para a destinação final deste resíduo, além de proporcionar uma valorização como produto ao ser utilizado como fertilizante e melhorar as características físicas do solo. Todavia, apesar das vantagens citadas, há uma preocupação quanto a contaminação do solo, da água e de organismos, visto que o lodo pode conter organismos patogênicos, metais pesados e contaminantes orgânicos sintéticos.

O experimento deste caso prático foi conduzido em uma estufa localizada na Estação Experimental da Embrapa, no município de Capão do Leão, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O lodo anaeróbio foi obtido de uma unidade de reator UASB, da Estação de Tratamento de Esgoto e Passo Fundo, Rio Grande do Sul. O esgoto tratado nesta estação é majoritariamente de origem doméstica, com contribuições pequenas de sedimentos do solo, mas sem interferência de efluentes industriais. O lodo anaeróbio foi coletado do leito de secagem da ETE e submetido ao processo de solarização. A fim de assegurar que a desinfecção ocorresse de forma eficiente, o lodo permaneceu neste processo por 60 dias, durante o verão. As características microbiológicas do lodo após o processo de solarização podem ser observadas na Tabela 10 a seguir.

Tabela 10 – Características microbiológicas do lodo de esgoto anaeróbio após processo de solarização e os limites máximos impostos pela Resolução CONAMA 375/2006.

	Concentração no lodo anaeróbio	Valor máximo permitido no lodo de esgoto pela R. CONAMA 375/2006
Coliformes Termotolerantes (NMP/g de sólidos totais)	45	<1000
Ovos de helmintos (ovos/ g de sólidos totais)	<0,25	<0,25
Salmonella (NMP/10g de sólidos totais)	ausente	Ausente
Vírus enterícos (UFP/g sólidos totais)	ausente	Ausente

Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2020).

Os resultados de tal experimento demonstraram que o lodo anaeróbio apresentava características extremamente desejáveis para sua aplicação na agricultura, como baixa densidade e índices elevados de carbono orgânico, nitrogênio, cálcio, enxofre e micronutrientes. Em relação aos contaminantes orgânicos e inorgânicos, os resultados encontrados foram abaixo dos limites impostos pela Resolução CONAMA 375/2006.

O baixo pH do lodo aplicado, decorrente das anormalidades durante o processo de digestão, afetou fortemente o pH do solo ao reduzi-lo linearmente de acordo com o aumento das taxas de lodo anaeróbio. Tal situação sugeriu que o resíduo possa passar por algum processo de correção de pH antes de sua aplicação nos solos. Neste estudo, optou-se por utilizar calcário para a tal efeito. Baixos valores de pH são indesejados assim como valores elevados de pH, que podem reduzir o potencial fertilizante dos lodos de esgoto, devido à perda de nitrogênio durante este processo. Assim, com 56 dias de incubação foi alcançado o valor de 6,0, considerado ideal para diversas espécies, incluindo a alface.

Finalmente, pôde-se concluir que a adoção de uma tecnologia barata e simples, como é a solarização, reduz efetivamente o volume de lodo que precisa ser reutilizado ao mesmo tempo que preserva suas principais características para reuso agrícola. Ainda, essa etapa de tratamento adicional contribui para a redução dos níveis de contaminantes patogênicos. O lodo, ao ser aplicado como fertilizante orgânico, demonstrou significativo impacto na nutrição das mudas de alface, especialmente na concentração de nitrogênio, enxofre, zinco, ferro e magnésio das folhas. As limitações devido ao pH ácido deste tipo de lodo podem ser sanadas com a correção por meio da utilização de calcário, sendo esta uma alternativa eficiente já aplicada nas

produções agrícolas para suprir outras deficiências. Em suma, o experimento conduzido por Pereira et al. (2020) demonstrou que a gestão do lodo anaeróbio através de solarização, correção de pH e posterior reuso agrícola é uma alternativa viável e barata do ponto de vista operacional, podendo ser aplicada nas mais diversas regiões do mundo, em especial nos países em desenvolvimento.

4.1.2 Potencial agrônômico para uma gestão sanitária sustentável no Brasil: Reciclagem de nutrientes, patógenos e micro poluentes

Este estudo, desenvolvido por Amorim Junior et al., 2021, foi conduzido a partir do lodo gerado por uma Estação de Tratamento de esgotos da cidade de Campo Grande, estado do Mato grosso do Sul. Esta ETE opera em três etapas: tratamento preliminar com retenção de sólidos grosseiros e caixa de areia; tratamento primário operado por reator UASB; e na última etapa, o esgoto é conduzido para um tanque de floculação e decantação para aplicação de tratamento físico-químico. Por fim, o lodo gerado pelo UASB é destinado para leitos de secagem e disposto como bio-sólido em compostagem.

Para as análises do estudo, foram coletadas diretamente do leito de secagem quatro amostras a cada três meses durante o ano de 2018. Estas amostras eram destinadas à um laboratório para realização dos devidos testes. Em relação ao potencial agrônômico do lodo, o experimento visou investigar os macronutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, manganês e enxofre e a demanda por estes nas culturas de eucalipto, soja, laranja e tomate.

Os resultados obtidos demonstraram que em relação ao nitrogênio, a quantidade disponível atingiu a demanda da cultura de eucalipto em 40%, em 33% para a laranja, 27% para o tomate e 20% para a soja. Sabe-se que a maior parcela deste nitrogênio se encontra na forma orgânica e está disponível para as plantas logo após a degradação da matéria orgânica.

Quanto ao fósforo, os níveis encontrados no lodo aplicado demonstraram resultados extremamente satisfatórios. A quantidade disponível atingiu 369% da demanda da cultura de laranja, 166% da demanda do eucalipto, 98% para a soja e 77% para os tomates. Ressalta-se que a importância da presença de fósforo nos lodos relaciona-se com a sua biodisponibilidade que permite sua utilização pelas plantas, além da sua função nutricional especialmente em solos tropicais que apresentam baixo teor de P.

No que diz respeito ao potássio, os resultados apresentaram que este nutriente atingiu baixa porcentagem da demanda dos cultivos analisados, semelhante à demais estudos

existentes. Observou-se que a aplicação de lodo não foi capaz de proporcionar o aumento da disponibilidade de potássio em comparação à utilização de fertilizantes minerais. Entretanto, pode apresentar resultados positivos ao combinar ambas aplicações.

Para os nutrientes magnésio e cálcio, presentes essencialmente na forma de minerais, pequenas doses demonstraram já suprir a demanda de alguns dos cultivos. A análise de enxofre demonstrou que este atendeu parcialmente a demanda do cultivo de eucalipto e tomate e totalmente para as demandas das produções de soja e laranja.

Os resultados encontrados quanto a presença de patógenos indicaram que o lodo aplicado se enquadrava como classe B, em virtude da concentração de *E. Coli.* acima do permitido para classifica-lo como lodo tipo A. Tal valor para este organismo patogênico pode ser explicado por um tempo de permanência inadequado nos leitos de secagem, ou do fato das amostras serem provenientes de lodo fresco ou ainda de o reator UASB não apresentar a função de remoção de patógenos. O estudo lembra que a Resolução CONAMA 498/2020 permite a aplicação de lodos classe B em cultivos de produtos que não venham a ser consumidos crus, em produtos não comestíveis, pastagens e em árvores frutíferas, desde que seja respeitado o intervalo de aplicação e da colheita. Em comparação, a antiga Resolução CONAMA 375/2006 mostrava-se mais restritiva quanto à utilização deste tipo de lodo. Quanto às legislações internacionais, lodos de classe B podem ser aplicados em qualquer tipo de cultura quando os intervalos de aplicação e colheita são devidamente seguidos.

Por fim, quanto à presença de contaminantes inorgânicos, os resultados do estudo demonstraram que as concentrações ficaram abaixo dos limites estabelecidos pela Instrução Normativa 7/06, pela Resolução CONAMA 498/2020, pela Norma 503 e pela ECC 278/1986, com exceção do zinco. Tais resultados estão de acordo com o que há na literatura, os quais consideram insignificante a bioacumulação de metais no solo causada pela aplicação de lodo.

O estudo concluiu confirmando o potencial de aplicação de lodo na agricultura. O lodo aplicado mostrou quantidade de nutrientes suficientes para suprir parcial ou integralmente a demanda dos cultivos analisados, com exceção do potássio.

4.1.3 Lodo de esgoto como matriz na fabricação de fertilizantes organominerais: formas físicas, riscos ambientais e reciclagem de nutrientes

Um estudo desenvolvido por Rodrigues et al., 2021 buscou avaliar os riscos da utilização de fertilizantes organominerais espalharem elementos traços perigosos nos solos

agrícolas, utilizando lodo de esgoto com alta concentração de zinco como matriz da sua produção. Os resultados obtidos com o experimento foram comparados ao uso de fertilizantes minerais convencionais.

Para o experimento, foram coletados dois tipos de solo de mesma classificação, mas com texturas contrastantes – um argiloso e outro do tipo franco argila-arenoso. As amostras coletadas foram da camada mais superior do solo, e em seguida foram secas ao ar, peneirados (2mm) e armazenados em condições ambientais. Algumas sub amostras foram coletadas para avaliar a textura dos solos, a fertilidade e o conteúdo de elementos traços. O lodo de esgoto a ser utilizado foi obtido a partir de uma ETE localizada na cidade de São José do Rio Preto, no Estado de São Paulo, a qual trata majoritariamente esgotos de origem doméstica. O sistema de tratamento conta com um reator UASB seguido de tratamento convencional por lodo ativado. As amostras de lodo coletado foram secas ao ar em condições naturais, protegidas com uma camada plástica, secas à 65°C durante 48h e então peneiradas (2mm). Sub amostras foram utilizadas para avaliar organismos patogênicos, atributos químicos de interesse agrônomico e elementos traços perigosos.

Para a produção dos fertilizantes organominerais, primeiramente foi utilizada uma determinada proporção para a fabricação da forma em pó. Esta forma de fertilizante foi utilizada como matriz na produção das formas granuladas e em pastilhas.

Os resultados obtidos demonstraram que, em relação a segurança quanto à presença de patógenos, o lodo utilizado, segundo a Resolução CONAMA 498/2020, pode ser considerado livre de organismos patogênicos, devido a concentração de coliformes termotolerantes ser inferior à 10^3 NMP/g. Tal conclusão indica um possível potencial no qual processos simples nas amostras de lodo, como o uso do calor ou secagem, são suficientes para suprimir o que ainda há de agentes patogênicos.

Quanto à presença de elementos traços, os conteúdos encontrados nas amostras de lodo estavam de acordo com os limites estabelecidos tanto pela Resolução CONAMA 498/2020 como pela legislação europeia ECC 278/1986, considerando seu uso como resíduo orgânico na agricultura. Entretanto, foi possível observar que as quantidades de elementos traços nos fertilizantes organominerais produzidos e analisados eram ainda menores. Os autores citam ainda que, estudos anteriores demonstraram que apenas quatro de dezenove ETES no Estado de São Paulo produziam lodos inadequados para o reuso na agricultura, devido à alta concentração de zinco ou níquel. Todavia, ressalta-se que ambos os nutrientes são essenciais para plantas e que solos tropicais são frequentemente pobres de suas presenças. O estudo em questão enfatiza

que a aplicação de fertilizantes organominerais tende a ocorrer em taxas muito menores do que a simples aplicação de lodo de esgoto, o que diminui a preocupação quanto a presença de elementos traços no solo. Em adição, além de promover a diluição de elementos traços considerados perigosos, o uso de fertilizantes organominerais produzidos com lodo de esgoto promovem a liberação de substâncias húmicas capazes de complexar metais pesados.

Tais resultados confirmaram que o uso de aterros sanitários não é uma estratégia sustentável, e por este motivo vem tornando-se cada vez mais restritivo em diversos países. Ainda, ressalta que o Brasil é um dos grandes responsáveis pela produção mundial de bens agrícolas, mas ainda importa grande parte dos fertilizantes necessários, ao mesmo tempo que grande parte do lodo gerado – e fortemente carregado de importantes nutrientes para plantas – está sendo destinado aos aterros sanitários. Assim, de acordo com os resultados demonstrados anteriormente, o uso do lodo de esgoto na produção de fertilizantes organominerais, mesmo aqueles com índices mais altos de zinco e níquel, apresenta-se como uma estratégia importante na reciclagem de nutrientes e na redução de riscos da propagação de elementos traços perigosos para o solo, além de outros poluentes.

Quanto a produção de soja, independente da forma física aplicada e comparando-as com o uso de fertilizantes minerais, o uso de fertilizantes organominerais produzidos com lodo de esgoto melhoraram a acumulação dos nutrientes, além do número de vagens produzidas e da nodulação, bem como da atividades microbiológica no solo, o que deve resultar numa maior produtividade do cultivo da soja.

4.2 AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DE RISCO MICROBIOLÓGICO

4.2.1 Cenário 1 – Manuseio de solo/lodo

A Tabela 11 a seguir apresenta as doses encontradas para os microrganismos *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, de acordo com as concentrações contidas nas referências abordadas, para o cenário 1. Ressalta-se que para as Resoluções CONAMA foram apresentados valores para os lodos classe A e B. A Tabela 12 expõe a probabilidade de infecção causada pelos microrganismos analisados, conforme modelo dose-resposta mais adequado e as doses da Tabela 11.

Tabela 11 – Doses para *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 1.

Referências	<i>E. Coli</i> (NMP/dia)	Helmintos (ovo/dia)	<i>Salmonella</i> (NMP/dia)	Enterovírus (UFP/dia)
Resolução CONAMA 375/2006	26,4 ¹ 26400 ²	0,0825 ¹ 3,3 ²	NA -	0,0825 ¹ -
Resolução CONAMA 498/2020	26,4 ¹ 26400 ²	0,33 ¹ -	- -	- -
Navarro et al. (2008)	-	1,32	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,0066	-
Amorim Junior et al. (2021)	240,24	0,0825	-	1,1847

¹ Lodos de Classe A

² Lodos de Classe B

NA: não aplicável.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 12 – Probabilidade de infecção por *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 1.

	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovírus
Resolução CONAMA 375/2006	0,017% 10,748%	0,752% 13,448%	- -	0,031% -
Resolução CONAMA 498/2020	0,017% 10,748%	2,699% -	- -	- -
Navarro et al. (2008)	-	7,889%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,073%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,152%	0,752%	-	0,442%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observa-se que, para o patógeno *E. Coli*, a probabilidade de infecção, segundo as Resoluções CONAMA 375/2006 e 498/2020 é de 0,017% para os lodos classificados como classe A, e 10,748% para os lodos classificados como classe B. Por sua vez, a probabilidade de infecção obtida através da concentração encontrada no estudo de Amorim Junior et al. (2021) é igual a 0,152%. Sendo assim, é possível verificar que há uma maior chance de ocorrer uma infecção por manuseio, pelo agricultor, de solo com lodo aplicado em concentrações determinadas pelo CONAMA para lodos classe B do que para uma concentração obtida em estudo real. Por último, a concentração imposta para os lodos classe A são as que oferecem a menor probabilidade de infecção neste cenário, para este patógeno. Ressalta-se aqui que o risco calculado para *E. Coli* foi considerando que, na concentração de coliformes termotolerantes, apenas 8% corresponde à parcela de *E. Coli* patogênica. Entretanto, esta parcela pode variar, e consequentemente, o risco oferecido por este patógeno.

Para a análise de ovos de helmintos, há uma probabilidade de infecção para lodos classe A e B de 0,752% e 13,448%, respectivamente, segundo a Resolução CONAMA 375/2006. O resultado de probabilidade de infecção para a Resolução CONAMA 498/2020 para lodos classificados como classe A foi de 2,699%, sendo este superior quando comparado ao mesmo tipo de lodo conforme à Resolução CONAMA 375/2006. Este resultado já era esperado, tendo em vista que a resolução mais recente se mostra menos restritiva quanto ao limite de ovos de helmintos para lodos classe A. A probabilidade de infecção obtida por meio do estudo de Navarro et al. (2008) é de 7,889%, sendo este superior ao resultado apresentados para ambas as Resoluções quanto aos lodos de classe A, mas ainda inferior quando comparado ao resultado para o lodo de classe B da Resolução CONAMA 498/2020. Por último, para o estudo de caso apresentado por Amorim Junior et al. (2021), a probabilidade de infecção resultante foi de 0,752%, semelhante ao apresentado para lodos classe A da Resolução CONAMA 375/2006.

Para o patógeno *Salmonella*, observa-se somente um resultado de probabilidade de risco, alcançado por meio do estudo desenvolvido por Krzyzanowski et al. (2016), sendo este no valor de 0,073%. Quanto as Resoluções, a CONAMA 375/2006 apenas menciona que deve haver ausência deste microrganismo em 10g de ST. Por este motivo, não foi analisado algum valor de dose para posterior aplicação de probabilidade de risco.

Quanto aos enterovírus, observa-se que há uma probabilidade de infecção de 0,031% pelo limite determinado pela Resolução CONAMA 375/2006, para lodos classe A. Este resultado é inferior ao obtido para o estudo desenvolvido por Amorim Junior et al. (2021), que resultou em uma probabilidade de infecção de 0,442%.

No cenário 1 analisado, em linhas gerais, o maior risco de infecção é proporcionado pela concentração de helmintos de lodo classe B da Resolução CONAMA 375/2006, seguido do risco para infecção por *E. Coli* para lodo classe B de ambas as resoluções avaliadas. Em relação aos menores riscos, destaca o decorrente da infecção por *E. Coli* para lodos classe A de ambas as resoluções, seguido do risco por enterovírus para lodo classe A da Resolução CONAMA 375/2006.

Cabe ressaltar aqui que, segundo a Resolução CONAMA 375/2006, nenhum tipo de lodo pode ser aplicado a culturas de olerícolas, tubérculos, raízes e culturas inundadas. Logo, considerando que a cenoura é uma raiz tuberculosa, esta não poderia ser cultivada em um solo com aplicação de lodo. Para a Resolução CONAMA 498/2020, o lodo classe A pode ser aplicado ao cultivo de cenouras, desde que respeitada a restrição de não aplicar o lodo um mês antes do período da colheita. Entretanto, para lodos classe B, este cultivo não é permitido uma vez que a Resolução deixa claro que este tipo de lodo não pode ser aplicado em cultivos de alimentos que possam ser consumidos crus, como é o caso da cenoura.

4.2.2 Cenário 2 – Ingestão de cenoura produzida em solo com aplicação de lodo, sem higienização

A Tabela 13 apresenta os resultados das doses para os microrganismos *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, de acordo com as concentrações das referências utilizadas, para o cenário de exposição 2, onde foi considerado o cultivo de cenouras em solos com lodo aplicado, sem processos de higienização. Na Tabela 14, por sua vez, são apresentados os valores de probabilidade de infecção resultantes da aplicação das doses da Tabela 13, conforme modelo dose-resposta para cada um dos microrganismos analisados.

Tabela 13 - Doses para *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 2.

Referências	<i>E. Coli</i> (NMP/dia)	Helmintos (ovo/dia)	<i>Salmonella</i> (NMP/dia)	Vírus (UFP/dia)
Resolução CONAMA 375/2006	112 ¹ 112000 ²	0,35 ¹ 14 ²	NA -	0,35 ¹ -
Resolução CONAMA 498/2020	112 ¹ 112000 ²	1,4 ² -	- -	- -
Navarro et al. (2008)	-	5,60	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,03	-
Amorim Junior et al. (2021)	1019,20	0,35	-	5,03

¹ Lodos de Classe A

² Lodos de Classe B

NA: não aplicável.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 14 - Probabilidade de infecção por *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 2.

	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovírus
Resolução CONAMA 375/2006	0,071% 23,420%	2,840% 23,869%	- -	0,131% -
Resolução CONAMA 498/2020	0,071% 23,420%	8,201% -	- -	- -
Navarro et al. (2008)	-	17,153%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,306%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,633%	2,840%	-	1,862%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O primeiro microrganismo patogênico analisado é a *E. Coli*. Foram obtidos valores de probabilidade de infecção, para ambas as Resoluções CONAMA, de 0,071% e 23,420%, para lodos classe A e B, respectivamente. A probabilidade de infecção obtida com o estudo de Amorim Junior et al. (2021) foi de 0,633%, inferior ao resultado obtido para os lodos classe B, mas superior para os classificados como A.

Para os helmintos, a Resolução CONAMA 375/2006, em lodos classe A e B, demonstrou, respectivamente, probabilidade de infecção de 2,84% e 23,869%. A Resolução CONAMA 498/2020, por sua vez, apresentou probabilidade de infecção de 8,201% para lodos classe A. Quando comparado este resultado ao da CONAMA 375/2006, observa-se um aumento de risco de infecção, o que era esperado, visto que a resolução mais recente se apresenta menos restritiva quanto ao seu limite de concentração. Para os estudos de caso apresentados, os valores

de probabilidade de infecção foram de 17,153% para Navarro et al. (2008) e 2,84% para Amorim Junior et al. (2021). O lodo estudado por Navarro et al. (2008) pode ser classificado como classe B de acordo com a sua concentração de ovos de helmintos, segundo a Resolução CONAMA 375/2006. Sendo assim, o resultado obtido mostra-se encorajador para a aplicação do reuso de lodo na agricultura, tendo em vista que foi inferior à probabilidade alcançada pelo limite imposto pela resolução, para o mesmo tipo de lodo. O risco de infecção do lodo estudo por Amorim Junior et al. (2021) foi igual ou inferior aos riscos obtidos para as resoluções.

Para a análise de *Salmonella*, observa-se apenas o resultado para o estudo de caso desenvolvido por Krzyzanowski et al. (2016), com uma probabilidade de infecção de 0,306%. Este resultado mostra-se superior ao obtido para o cenário de exposição 1, uma vez que o volume de ingestão é maior, aumentando consequentemente a dose de exposição e o risco. Quanto às comparações com as Resoluções CONAMA pertinentes ao assunto, não há valores para serem analisados, tendo em vista que somente a Resolução CONAMA 375/2006 aborda este microrganismo, com a orientação de ausência em 10g de ST.

Para os enterovírus, último patógeno avaliado, os valores obtidos para probabilidade de infecção foram de 0,131% para a Resolução CONAMA 375/2006 em lodos classe A e 1,862% para o lodo analisado por Amorim Junior et al. (2021). Ainda, observa-se que para este cenário, em comparação ao primeiro apresentado, o risco de infecção é superior, tendo em vista a dose de exposição maior que o indivíduo é submetido.

Por fim, em termos gerais, para o cenário 2 observa-se que o maior risco de infecção é consequência da concentração de helmintos em lodos classe B da Resolução CONAMA 375/2006, seguido do risco por *E. Coli* em lodos classe B de ambas as resoluções. Estes resultados permitem uma breve discussão sobre uma possível não recomendação de lodos com tais concentrações ou restrições de ingestão quando aplicado a culturas de consumos de alimentos crus, a fim de minimizar este possível risco de infecção. Enfatiza-se aqui a importância do monitoramento microbiológico dos lodos a serem destinados ao reciclo agrícola, bem como dos solos onde houve a aplicação, a fim de não permitir as aplicações ou buscar alternativas para que as concentrações de patógenos sejam reduzidas. Os menores riscos de infecção são encontrados para concentrações de *E. Coli* em lodos classe A de ambas as resoluções avaliadas, seguido do risco por enterovírus para lodo classe A na Resolução CONAMA 375/2006.

4.2.3 Cenário 3 - Ingestão de cenoura produzida em solo com aplicação de lodo, com higienização

A Tabela 15 a seguir apresenta as doses encontradas para *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, conforme concentrações das referências aplicadas, para o cenário de exposição 3, referente ao cultivo de cenouras em solo com aplicação de lodo, com higienização deste vegetal, proporcionando uma redução de 74% da carga de patógenos. A Tabela 16 apresenta os valores de probabilidade de infecção para as doses da Tabela 15 e dos modelos de dose-resposta aplicados.

Tabela 15 - Doses para *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 3.

Referências	<i>E. Coli</i> (NMP/dia)	Helmintos (ovo/dia)	<i>Salmonella</i> (NMP/dia)	Enterovirus (UFP/dia)
Resolução CONAMA 375/2006	29,12 ¹ 29120 ²	0,091 ¹ 3,64 ²	NA -	0,091 ¹ -
Resolução CONAMA 498/2020	29,12 ¹ 29120 ²	0,364 ¹ -	- -	- -
Navarro et al. (2008)	-	1,46	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,01	-
Amorim Junior et al. (2021)	264,99	0,09	-	1,31

¹ Lodos de Classe A

² Lodos de Classe B

NA: não aplicável.

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 16 - Probabilidade de infecção por *E. Coli*, helmintos, *Salmonella* e enterovírus, conforme referências, no cenário de exposição 3.

	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovirus
Resolução CONAMA 375/2006	0,018% 11,467%	0,826% 14,115%	- -	0,034% -
Resolução CONAMA 498/2020	0,018% 11,467%	2,937% -	- -	- -
Navarro et al. (2008)	-	8,412%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,080%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,167%	0,826%	-	0,488%

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para o patógeno *E. Coli*, foram encontrados valores de probabilidade de infecção de 0,018% para lodos classe A e 11,467% para lodos classe B, em ambas as Resoluções CONAMA. O lodo estudado por Amorim Junior et al. (2021) apresentou um risco de infecção de 0,167%, inferior ao risco calculado pelo limite máximo para lodos classe B e superior ao risco encontrado para lodos classe A nas Resoluções CONAMA. Observa-se que os riscos para este patógeno no cenário 3 são inferiores aos valores apresentados no cenário 2, resultado este esperado, tendo em vista que a higienização com água corrente de boa qualidade proporcionou uma redução da dose de exposição ao minimizar as concentrações de patógenos presentes na cenoura. Em relação ao cenário de manuseio do solo com lodo pelo agricultor, os riscos apresentados no cenário 3 são superiores.

Em relação aos helmintos, para os lodos classe A e B da Resolução CONAMA 375/2006, os resultados obtidos foram, respectivamente, 0,826% e 14,115%. O risco de infecção para o lodo de classe A segundo a Resolução CONAMA 498/2020 é de 2,937%, sendo este superior ao observado para o mesmo tipo de lodo na resolução anterior. Este resultado era esperado, tendo em vista que o limite para lodos classe A para helmintos é menor na resolução mais recente. O resultado apresentado para o lodo de Navarro et al. (2008), que se classifica como classe B segundo a CONAMA 375/2006, é de uma probabilidade de risco de 8,412%, sendo este inferior ao resultado obtido para o limite da resolução. Para o lodo analisado por Amorim Junior et al. (2021) o risco de infecção é de 0,826%, inferior e/ou igual aos resultados obtidos para as resoluções. Quando comparados aos valores do cenário anterior, onde foi considerada a ingestão da cenoura com solo remanescente no vegetal e sem passar por processo de higienização, os resultados deste cenário apresentam-se, assim como no caso da *E. Coli*, inferiores. Isto explica-se pela redução da carga de microrganismos proporcionada pelo método de higienização proposto para as cenouras.

O risco de infecção para a *Salmonella*, segundo o estudo de Krzyzanowski et al. (2016), foi de 0,080%. Conforme explicado nos cenários anteriores, não há resultados de probabilidade de infecção para este patógeno segundo os limites das resoluções em estudo. Ressalta-se aqui, mais uma vez, o que já foi exposto para os patógenos *E. Coli* e helmintos, no que diz respeito à redução do risco neste cenário em comparação ao cenário de exposição 2.

Para os enterovírus, o lodo de classe A da Resolução CONAMA 375/2006 apresentou um risco de infecção de 0,034%. O lodo de Amorim Junior et al. (2021) apresentou uma probabilidade de risco de 0,488%. Ambos os resultados corroboram com o exposto para os patógenos discutidos anteriormente no que se refere à diminuição de probabilidade de risco do

cenário de ingestão da cenoura produzida no solo com aplicação de lodo e com a higienização do vegetal para o cenário da ingestão do mesmo vegetal, mas sem as medidas de higienização. Isto explica-se pela redução de carga de microrganismos após a higienização das cenouras.

Em termos gerais, os maiores riscos observados no cenário 3 são semelhantes aos observados no cenário 2.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho foi desenvolvido a fim de avaliar a viabilidade, do ponto de vista da saúde ambiental, do reuso agrícola do lodo. Para isto, foi aplicada a metodologia AQRM, com as concentrações das duas resoluções que regulam o reciclo de lodo no Brasil: a Resolução CONAMA 375/2006 e Resolução CONAMA 498/2020, sendo esta última a versão mais atualizada. Foram avaliados os cenários do manuseio do solo com lodo aplicado; do consumo de um vegetal produzido no solo com lodo, sendo este vegetal sem nenhum tipo de higienização; e por fim, o consumo do vegetal considerando uma higienização com água corrente de boa qualidade. Além disto, foram apresentados três estudos desenvolvidos no Brasil, onde a destinação final do lodo era para reciclo agrícola.

Os resultados obtidos pela metodologia AQRM permitem concluir que as probabilidades de infecção são pequenas, especialmente para os cenários de manuseio direto do solo com lodo e ingestão da cenoura após processo de higienização, que correspondem, respectivamente, ao manuseio do solo pelo agricultor e o consumo do vegetal, após processo de higienização. Para o cenário da ingestão da cenoura sem higienização, no entanto, os riscos de infecção foram maiores, com destaque para a probabilidade de infecção por helmintos devido ao limite de concentração imposto pela Resolução CONAMA 375/2006 de lodos classe B. Observa-se também um risco elevado para infecção pelo patógeno *E. Coli*, em um lodo classe B, seguindo as concentrações de ambas as resoluções.

No que diz respeito à eficiência das resoluções, destaca-se o fato que de nos três cenários avaliados os maiores riscos foram encontrados para os lodos classe B de ambas as resoluções CONAMA. Por isto, cabe especial atenção à classificação de lodos tipo B impostas por estas normativas, sendo necessário rever os critérios de aplicação, as restrições de uso e possíveis medidas que possam minimizar as consequências destes riscos. Uma medida mais direta e de cunho restritivo para esta situação seria a alteração dos limites máximos para os lodos classe B para os patógenos *E. Coli* e helmintos. Se diminuirmos a concentração máxima para *E. Coli* em lodos classe B de 10^6 NMP/g de ST para 10^5 NMP/g de ST, haveria, em média, uma redução de 81% do risco para este microrganismo nos três cenários avaliados. Para os helmintos, se a concentração máxima para classificar um lodo como classe B passasse a ser de 1 ovo/g de ST ao invés de 10 ovos/g de ST, isto implicaria numa redução média de 75% do risco para este patógeno nos lodos com esta classificação, dentro dos cenários avaliados.

Ainda sobre as eficiências das resoluções no aspecto quantitativo do risco oferecido, seria interessante uma discussão afim de buscar meios para promover a segurança daqueles que terão contato com o solo com lodo aplicado, ao invés de tornarmos a resolução mais restritiva para os lodos classe B, como citado anteriormente. Sendo assim, conclui-se que o incentivo ao uso de mais barreiras, tais como os equipamentos de proteção individual (EPIs), podem ser iniciativas que proporcionem maior segurança ao manuseio deste material e reduzam o risco de contaminação. Para um possível cenário de consumo, por exemplo, orientações de boas práticas de lavagem e higienização dos alimentos produzidos podem ser oferecidas como uma forma de promover, não apenas o incentivo à prática do reuso agrícola de lodo, mas também para expandir o campo de atuação da educação ambiental. Desta forma, ao evitarmos que as normativas para estas atividades se tornem mais restritivas – e consequentemente, menos atraentes – potencializamos o uso desta alternativa.

Quanto a eficiência das resoluções no que se refere ao risco proporcionado pelos limites apresentados para os lodos classe A, pode-se concluir que a resolução, nos cenários avaliados, mostrou-se eficiente e com resultados positivos. Os riscos para os lodos classe A de ambas as resoluções foram os menores, nos três cenários de avaliação.

Os estudos de caso apresentados apresentam resultados positivos e que podem encorajar a prática do reciclo de lodo no Brasil. Em nenhum dos casos, foi observado no lodo aplicado, concentrações de patógenos e outros contaminantes que superassem àquelas impostas pelas normativas que regulam o reuso agrícola no Brasil, e nem mesmo no mundo. Todavia, cabe ressaltar que nestes casos práticos foram aplicadas boas práticas de tratamento do lodo utilizado, cenário este que não é o que se observa usualmente. Os estudos apresentam ainda que o lodo pode ser destinado tanto para aplicação direta nos solos onde haverá cultivos agrícolas, como para o processo de fabricação de fertilizantes. Tais observações permitem concluir que o reciclo agrícola do lodo é uma alternativa interessante e que o transforma em produção com valor econômico, além de minimizar possíveis impactos ambientais, desde que as normativas existentes sejam seguidas.

Recomenda-se que sejam desenvolvidos estudos em escala piloto para este tipo de análise. Estudos com avaliação do lodo após este passar por processos de higienização, como caleação, solarização ou compostagem, onde há redução da carga patogênica, poderiam ser desenvolvidos e comparados com as concentrações das resoluções CONAMA e respectivos riscos microbiológicos. Ainda, seria de suma importância normativas que pudessem estabelecer um limite aceitável para risco de infecção pelos patógenos analisados.

Conclui-se que o reciclo agrícola do lodo é uma alternativa interessante e que precisa de monitoramento contínuo quanto aos parâmetros microbiológicos, não somente para controle do risco oferecido pelas diversas atividades e ações em torno do cenário agrícola, mas também para geração de conhecimento a respeito de limitações de riscos de infecção. É importante informar que, além da diminuição de impactos ambientais, o reciclo agrícola do lodo está em consonância com um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização Mundial da Saúde, sendo ele Cidades e Comunidades Sustentáveis. Este ODS tem como uma de suas metas reduzir, até 2030, o impacto ambiental negativo per capita das cidades, inclusive prestando atenção especial à qualidade do ar, gestão de resíduos municipais e outros.

REFERÊNCIAS

AMORIM JÚNIOR, S. S. DE et al. Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, 1 out. 2021.

AMORIM JUNIOR, S. S. et al. Agronomic potential of biosolids for a sustainable sanitation management in Brazil: Nutrient recycling, pathogens and micropollutants. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, 20 mar. 2021a.

ANDREOLI, Cleverson Vitório *et al* (org.). **Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura**. Curitiba: Prosab, Sanepar, 1999. 98 p.

ANDREOLI, Cleverson Vitório (org.). **Resíduos Sólidos do Saneamento: Processamento, Reciclagem e Disposição Final**. Curitiba: Prosab, 2001. 273 p.

ANDREOLI, Cleverson Vitório *et al* (ed.). **Sludge Treatment and Disposal**. London: Iwa Publishing, 2007. 258 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209**: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: Abnt, 2011. 59 p.

BRASIL. CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. (org.). **PIB do Agronegócio alcança participação de 26,6% no PIB brasileiro em 2020**. 2021. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/boletins/pib-do-agronegocio-alcanca-participacao-de-26-6-no-pib-brasileiro-em-2020>. Acesso em: 01 mar. 2022.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento (org.). **Diagnóstico Temático - Serviços de Água e Esgoto**. Brasília: Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento - Snis, 2021. 91 p.

BRASIL, Resolução CONAMA nº375, de 29 de agosto de 2006. **Critérios de e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.** Publicado no D.O.U. de 30 de agosto de 2006.

BRASIL, Resolução CONAMA nº498, de 19 de agosto de 2020. **Critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos.** Publicado no D.O.U. de 21 de agosto de 2020.

BREDA, C. C. et al. Successive sewage sludge fertilization: Recycling for sustainable agriculture. **Waste Management**, v. 109, p. 38–50, 15 maio 2020.

CAMPOS, José Roberto *et al* (org.). **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo.** Rio de Janeiro: Prosab, 1999. 443 p.

CHEN, H. M. et al. Nontyphoid Salmonella infection: Microbiology, clinical features, and antimicrobial therapy **Pediatrics and Neonatology**, jun. 2013.

CUSTODIO, M. et al. Human risk associated with the ingestion of artichokes grown in soils irrigated with water contaminated by potentially toxic elements, Junin, Peru. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 28, n. 10, p. 5952–5962, 1 out. 2021.

DEEPNARAIN, N. et al. Impact of sludge bulking on receiving environment using quantitative microbial risk assessment (QMRA)-based management for full-scale wastewater treatment plants. **Journal of Environmental Management**, v. 267, 1 ago. 2020.

DHANKER, R. et al. Influence of urban sewage sludge amendment on agricultural soil parameters. **Environmental Technology and Innovation**, v. 23, 1 ago. 2021.

KLEIN, Cláudia *et al*. Fósforo: de nutriente à poluente. **Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, Cascavel, v. 8, n. 8, p. 1713-17, set. 2012. Trimestral.

KNIHS, Victoria Walendowsky. **Avaliação quantitativa de risco microbiológico: estudo de caso aplicado ao uso recreativo do balneário da beira-mar norte, Florianópolis/SC.** 2019. 54 f.

TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

KRZYZANOWSKI, F. et al. Assessing the probability of infection by Salmonella due to sewage sludge use in agriculture under several exposure scenarios for crops and soil ingestion. **Science of the Total Environment**, v. 568, p. 66–74, 15 out. 2016.

NAVARRO, I. et al. **A quantitative microbial risk assessment of helminth ova in reusing sludge for agricultural production in developing countries.** WIT Transactions on Information and Communication Technologies. **Anais...2008.**

PEREIRA, I. DOS S. et al. Agricultural use and pH correction of anaerobic sewage sludge with acid pH. **Journal of Environmental Management**, v. 275, 1 dez. 2020.

PETTERSON, Susan *et al.* **Quantitative Microbial Risk Assessment:** Application for water safety management. Geneva: World Health Organization, 2016. 204 p.

QUANTITATIVE Microbial Risk Assessment. Disponível em: <http://qmrawiki.org/>. Acesso em: 17 jan. 2022.

RODRIGUES, M. M. et al. Sewage sludge as organic matrix in the manufacture of organomineral fertilizers: Physical forms, environmental risks, and nutrients recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 313, 1 set. 2021.

SANTOS, André Bezerra dos (org.). **Caracterização, Tratamento e Gerenciamento de Subprodutos de Correntes de Esgotos Segregados e Não Segregados em Empreendimentos Habitacionais.** Fortaleza: Imprece, 2019. 812 p.

SANTOS, Ytana Tadeu Oliveira. **Qualidade sanitária de hortaliças cultivadas em um distrito sanitário de Salvo-BA e eficiência de soluções antimicrobianas sobre linhagens de Escherichia Coli.** 2007. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Nutrição, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SCHMIDT, J. E. et al. **Safe recycling of sewage sludge on agricultural land-biowaste.** Process Safety and Environmental Protection. **Anais...**Institution of Chemical Engineers, 2006.

WORLD HEALTH ORGANIZATION et al. **Quantitative microbial risk assessment: application for water safety management.** 2016

APÊNDICE A – Cálculo do risco de infecção para os três cenários avaliados

CENÁRIO 1				
	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovírus
Resolução CONAMA 375/2006	0,017%	0,752%	-	0,031%
	10,748%	13,448%	-	-
Resolução CONAMA 498/2020	0,017%	2,699%	-	-
	10,748%	-	-	-
Navarro et al. (2008)	-	7,889%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,073%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,152%	0,752%	-	0,442%
CENÁRIO 2				
	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovírus
Resolução CONAMA 375/2006	0,071%	2,840%	-	0,131%
	23,420%	23,869%	-	-
Resolução CONAMA 498/2020	0,071%	8,201%	-	-
	23,420%	-	-	-
Navarro et al. (2008)	-	17,153%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,306%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,633%	2,840%	-	1,862%
CENÁRIO 3				
	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovírus
Resolução CONAMA 375/2006	0,018%	0,826%	-	0,034%
	11,467%	14,115%	-	-
Resolução CONAMA 498/2020	0,018%	2,937%	-	-
	11,467%	-	-	-
Navarro et al. (2008)	-	8,412%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,080%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,167%	0,826%	-	0,488%

APÊNDICE B – Cálculo do risco de infecção para os três cenários avaliados com redução das concentrações de E. Coli e helmintos nos lodos classe B das Resoluções CONAMA 375 e 498

CENÁRIO 1				
	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovírus
Resolução CONAMA 375/2006	0,017%	0,752%	-	0,031%
	1,581%	2,699%	-	-
Resolução CONAMA 498/2020	0,017%	2,699%	-	-
	1,581%	-	-	-
Navarro et al. (2008)	-	7,889%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,073%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,152%	0,752%	-	0,442%
CENÁRIO 2				
	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovírus
Resolução CONAMA 375/2006	0,071%	2,840%	-	0,131%
	5,690%	8,201%	-	-
Resolução CONAMA 498/2020	0,071%	8,201%	-	-
	5,690%	-	-	-
Navarro et al. (2008)	-	17,153%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,306%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,633%	2,840%	-	1,862%
CENÁRIO 3				
	<i>E. Coli</i>	Helmintos	<i>Salmonella</i>	Enterovírus
Resolução CONAMA 375/2006	0,018%	0,826%	-	0,034%
	1,733%	2,937%	-	-
Resolução CONAMA 498/2020	0,018%	2,937%	-	-
	1,733%	-	-	-
Navarro et al. (2008)	-	8,412%	-	-
Krzyzanowski et al. (2016)	-	-	0,080%	-
Amorim Junior et al. (2021)	0,167%	0,826%	-	0,488%