

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Pedro Henrique Araujo de Lima Santos

**Uso agrônômico de biossólidos em culturas anuais: avaliação quantitativa de
riscos microbiológicos para trabalhadores rurais**

Maceió

2023

Pedro Henrique Araujo de Lima Santos

Uso agronômico de bio sólidos em culturas anuais: avaliação quantitativa de riscos microbiológicos para trabalhadores rurais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof^a Dr^a Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira.

Coorientadora: Prof^a Dr^a Daniele Vital Vich

Maceió

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S237u Santos, Pedro Henrique Araujo de Lima.

 Uso agrônômico de bio sólidos em culturas anuais: avaliação quantitativa de riscos microbiológicos para trabalhadores rurais / Pedro Henrique Araujo de Lima Santos. – Maceió, 2023.

 47 f. : il., grafs. e tabs. color.

 Orientadora: Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira.

 Co-orientadora: Daniele Vital Vich.

 Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2023.

 Bibliografia: f. 44-47.

 1. Lodo de esgoto. 2. Aproveitamento agrícola. 3. Sustentabilidade. I. Título.

CDU: 628.4

Folha de Aprovação

AUTOR: Pedro Henrique Araujo de Lima Santos

Uso agronômico de biofósseis em culturas anuais: Avaliação Quantitativa de Riscos Microbiológicos para trabalhadores rurais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Professora Dra. Ivete Vasconcelos Lopes Ferreira - Universidade Federal de Alagoas (Orientadora)

Professora Dra. Daniele Vital Vich – Universidade Federal de Alagoas (Coorientadora)

Banca Examinadora:

Professora Dra. Karina Ribeiro Salomon - Universidade Federal de Alagoas

Professor Dr. Manoel Mariano Neto da Silva - Universidade Federal de Alagoas

RESUMO

Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) geram subprodutos sólidos que precisam ser gerenciados de forma segura para não comprometer o meio ambiente e a saúde da população. Dentre esses subprodutos, destaca-se o lodo gerado nas unidades de tratamento primário, biológico e físico-químico, que concentra boa parte dos poluentes e contaminantes removidos durante o tratamento do esgoto bruto. Após tratamento adequado, o lodo de esgoto transforma-se em um novo material, os bio sólidos, com grande potencial de uso agrícola, por suas propriedades nutricionais para plantas e de retenção de água no solo. O uso agrícola desses subprodutos é uma alternativa para disposição final, porém, o risco à saúde associado à presença de patógenos é um entrave à tal prática. As legislações que regulamentam a aplicação e uso de bio sólidos são, por vezes, muito restritivas, e não levam em consideração a avaliação de riscos. Nesse cenário, a Avaliação Quantitativa de Riscos Microbiológicos (AQRM) é uma ferramenta matemática que pode ser usada para calcular os riscos associados a diferentes patógenos em diferentes cenários de exposição. Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar os riscos microbiológicos em função do uso de bio sólidos no solo, para fins agrícolas, utilizando a AQRM para diferentes cenários de exposição dos trabalhadores rurais envolvidos nos processos de manejo e cultivo de culturas de cana-de-açúcar e feijão, tendo como microrganismo alvo *Ascaris lumbricoides*, a partir de dados secundários de lodo de esgoto obtidos em revisão bibliográfica. Após a aplicação da AQRM, os resultados indicaram que o risco anual de infecção por *Ascaris* para os trabalhadores rurais durante a aplicação dos bio sólidos variou de $3,35 \times 10^{-1}$ a $9,15 \times 10^{-1}$ pppa (por pessoa por ano), e o risco anual referente ao manejo das culturas variou de $1,10 \times 10^{-3}$ pppa a $8,10 \times 10^{-3}$ pppa, respectivamente para as culturas de cana-de-açúcar e de feijão avaliadas no estudo.

Palavras-chave: Lodo de esgoto; Aproveitamento agrícola; Uso sustentável.

ABSTRACT

Sewage Treatment Stations generate solid by-products that need to be managed safely so as not to compromise the environment and the health of the population. Among these by-products, the sludge generated in the primary, biological and physical-chemical treatment units stand out, which concentrates a large part of the pollutants and contaminants removed during the treatment of raw sewage. After adequate treatment, the sewage sludge is transformed into a new material, biosolids, with great potential for agricultural use, due to its nutritional properties for plants and retention of water in the soil. The agricultural use of these by-products is an alternative for final disposal, however, the health risk associated with the presence of pathogens is an obstacle to this practice. The laws that regulate the application and use of biosolids are sometimes very restrictive, and do not take into account the risk assessment. In this scenario, the Quantitative Microbiological Risk Assessment (QMRA) is a mathematical tool that can be used to calculate the risks associated with different pathogens in different exposure scenarios. Given this context, this work aims to evaluate the microbiological risks due to the use of biosolids in the soil, for agricultural purposes, using the QMRA for different scenarios of exposure of rural workers involved in the processes of management and cultivation of sugarcane and bean plantations, targeting *Ascaris lumbricoides*, based on secondary data from sewage sludge obtained in a literature review. After the application of the QMRA, the results indicated that the annual risk of infection by *Ascaris* for rural workers during the application of biosolids ranged from 3.35×10^{-1} to 9.15×10^{-1} pppa (per person per year), and the annual risk related to crop management ranged from 1.10×10^{-3} pppa to 8.10×10^{-3} pppa, respectively for sugarcane and bean crops evaluated in the study.

Keywords: Sewage sludge; Agricultural exploitation; Sustainable use.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais etapas e alternativas para o gerenciamento do lodo gerado em. ETEs.	16
Figura 2: Sistema de secagem e compostagem em estufa, ETE Lageado, Botucatu, SP.	18
Figura 3: Etapas da metodologia da pesquisa.	26
Figura 4: Gráfico comparativo de caracterização do risco anual (Pn) para o cenário 1.	42
Figura 5: Gráfico comparativo de caracterização do risco anual (Pn) para o cenário 2.	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Métodos para tratamento de lodo.....	14
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros agronômicos, substâncias químicas e qualidade microbiológica de lotes de biossólido destinados para uso agrícola no Paraná, em 2017 e 2018....	16
Tabela 2: Limites de concentrações de ovos de helmintos para utilização de biossólidos, conforme a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, Conselho Nacional de Meio Ambiente do Brasil e Organização Mundial da Saúde..	25
Tabela 3: Médias e desvios padrões de concentração de ovos viáveis de helmintos por grama de matéria seca.....	35
Tabela 4: Concentrações de ovos viáveis de <i>Ascaris</i> por gramas de sólidos totais..	35
Tabela 5: Avaliação da exposição para os trabalhadores rurais durante o cenário 1.	37
Tabela 6: Avaliação da exposição para os trabalhadores rurais durante o cenário 2.	37
Tabela 7: Avaliação da dose-resposta para os trabalhadores rurais no cenário 1....	38
Tabela 8: Avaliação da dose-resposta para os trabalhadores rurais no cenário 2....	38
Tabela 9: Caracterização do risco anual (Pn) para o cenário 1.....	39
Tabela 10: Caracterização do risco anual (Pn) para o cenário 2.	39
Tabela 11: Concentração tolerável de <i>Ascaris</i> em biossólidos para o cenário 1.	40
Tabela 12: Concentração tolerável de <i>Ascaris</i> em biossólidos para o cenário 2.	40
Tabela 13: Concentrações toleráveis de helmintos em biossólidos para o risco anual tolerável de $1,2 \times 10^{-4}$ pppa.....	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	OBJETIVO GERAL	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1	LODO DE ESGOTO E BIOSSÓLIDOS	13
3.2	TRATAMENTO DO LODO	14
3.3	EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS DE USO DE BIOSSÓLIDO EM SOLO	16
3.3.1	MICROGARNISMOS INDICADORES	18
3.3.2	MICROORGANISMOS ALVO: HELMINTOS	19
3.3.3	<i>Ascaris lumbricoides</i>	19
3.4	ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS MICROBIOLÓGICOS	20
3.5	IMPORTÂNCIA DA FERRAMENTA AQRM PARA FORMULAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES.....	21
3.6	ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS AO GERENCIAMENTO DO LODO E USO DE BIOSSÓLIDOS.....	22
3.6.1	PADRÕES INTERNACIONAIS.....	23
3.6.2	PADRÕES NACIONAIS	24
3.6.3	AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS DISPOSITIVOS REGULATÓRIOS VIGENTES	25
4	MÉTODOS.....	26
4.1	DADOS DE BIOSSÓLIDO A SEREM AVALIADOS	26
4.2	APLICAÇÃO DA AQRM	27
4.2.1	CULTURAS CONSIDERADAS.....	27
4.2.2	POPULAÇÃO ALVO.....	27
4.2.3	CENÁRIOS AVALIADOS.....	27
4.3	ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS MICROBIOLÓGICO	27
4.3.1	IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO.....	28
4.3.2	AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO	28
4.3.2.1	CONCENTRAÇÃO DE MICRORGANISMOS PATOGÊNICOS NO BIOSSÓLIDO	29
4.3.2.2	TAXAS DE APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDOS.....	29
4.3.2.3	DECAIMENTO NATURAL DE MICRORGANISMOS PATOGÊNICOS NO SOLO	30
4.3.2.4	MODO DE APLICAÇÃO DE E INGESTÃO INVOLUNTÁRIA DE BIOSSÓLIDO PELOS TRABALHADORES RURAIS	30

4.3.3	AVALIAÇÃO DA DOSE RESPOSTA.....	30
4.3.4	CARACTERIZAÇÃO DO RISCO	31
4.4	DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS DE CONCENTRAÇÕES DE PATÓGENOS NOS BIOSSÓLIDOS PARA ATENDER AOS NÍVEIS DE RISCOS TOLERÁVEIS.....	32
4.4.1	PROBABILIDADE DE INFECÇÃO TOLERÁVEL PARA EXPOSIÇÃO ÚNICA (P _i)	33
4.4.2	DOSE TOLERÁVEL POR EXPOSIÇÃO (D _i)	33
4.4.3	CONCENTRAÇÃO TOLERÁVEL DE <i>ASCARIS</i> EM BIOSSÓLIDOS (C _{ASC.BIOSLD}).....	34
4.5	DISCUSSÃO SOBRE OS VALORES ADOTADOS POR LEGISLAÇÕES...	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
5.1	DADOS DE BIOSSÓLIDOS AVALIADOS.....	35
5.1.1	CONCENTRAÇÃO DE OVOS VIÁVEIS DE <i>ASCARIS LUMBRICOIDES</i> 35	
5.2	ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS MICROBIOLÓGICOS	35
5.2.1	IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO.....	36
5.2.2	AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO	36
5.2.3	AVALIAÇÃO DA DOSE-RESPOSTA.....	37
5.2.4	CARACTERIZAÇÃO DO RISCO ANUAL DE INFECÇÃO.....	38
5.3	CONCENTRAÇÃO DE HELMINTOS NOS BIOSSÓLIDOS PARA ATENDER AOS NÍVEIS DE RISCOS TOLERÁVEIS (VMP).....	40
5.4	DISCUSSÃO SOBRE OS VALORES ADOTADOS POR LEGISLAÇÕES...	41
6	CONCLUSÕES.....	43
	REFERÊNCIAS.....	44

1 INTRODUÇÃO

Dentre os problemas ambientais agravados pela crescente população urbana, dois dos mais significativos são, sem dúvidas, o aumento da geração de efluentes domésticos e industriais, que necessitam uma destinação final adequada para as milhares de toneladas de resíduos gerados diariamente em todo mundo pelo tratamento desses efluentes.

O tratamento de esgoto sanitário produz uma variedade de subprodutos sólidos que, caso não sejam adequadamente gerenciados, podem causar uma série de problemas, como geração de odores, atratividade de vetores e impactos de diferentes graus de magnitude sobre o meio ambiente e a saúde pública. Esses subprodutos são gerados nas diferentes unidades que integram uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) (BARROS *et al.*, 2021). Os subprodutos sólidos gerados nas unidades de tratamento primário e biológico, o lodo primário e lodo secundário (ou biológico), ou simplesmente lodo de esgoto, são de particular interesse para este trabalho.

A produção de lodo de esgotos vem crescendo em todo o mundo como resultado do crescimento populacional e das exigências cada vez mais restritivas de tratamento de efluentes (MAGALHÃES, 2012). Até recentemente, o lodo produzido nas ETEs era simplesmente considerado um resíduo na visão dos gestores, cujo gerenciamento representava apenas custos, notadamente com o seu tratamento, transporte e disposição final. Esse entendimento ainda predomina na grande maioria das ETEs brasileiras, mas um grande esforço vem sendo feito nos últimos anos no sentido de melhor entender (e explorar) as várias possibilidades de valorização desse subproduto do tratamento de esgoto, tendo em vista sua constituição bastante favorável em termos de nutrientes e matéria orgânica (BARROS *et al.*, 2021).

Quando esse lodo de esgoto é devidamente tratado (desidratado, estabilizado e higienizado), se transforma em um novo tipo de material, os bio sólidos, que segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency), são materiais orgânicos com diversos nutrientes resultantes do tratamento de lodo de esgoto. Bastos *et al.* (2013, p.11) afirmam que, “Em paralelo ao crescimento da produção de lodo de esgotos, cresce também o interesse pelo uso benéfico dos bio sólidos”, considerando que esse material é rico em matéria orgânica e possui macronutrientes, como nitrogênio e fósforo, essenciais para o desenvolvimento vegetal.

Apesar desses benefícios, existe uma preocupação já que esses resíduos derivados do tratamento de esgoto apresentam em sua composição patógenos que causam impactos adversos à saúde, inclusive à saúde ocupacional dos trabalhadores que manipulam esse material, desde a preparação do solo (aplicação do bio sólido) até a colheita. Durante a realização dessas atividades, é possível a ingestão involuntária de partículas de bio sólidos, o que pode resultar em infecções, como as causadas por helmintos.

Em função disso, vários países impõem normas rigorosas com critérios bastante exigentes de qualidade microbiológica dos bio sólidos e restrições de uso desse material (BASTOS *et al.*, 2013). Porém, muitos especialistas criticam o fato de que tais limites foram baseados em evidências epidemiológicas limitadas, e não pela estimativa de risco real para a saúde (BLUMENTHAL *et al.*, 2000; EISENBERG *et al.*, 2008; NAVARRO *et al.*, 2009).

Devido a essa busca por medida e estimativa do risco, surge a Análise Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM), sendo uma técnica de modelagem probabilística que pode ser usada para calcular os riscos associados a diferentes patógenos em diferentes cenários de exposição ao risco. O uso dessa ferramenta para estabelecer os riscos à saúde envolvidos na aplicação de bio sólidos na agricultura pode ser a única abordagem plausível e adequada quando o risco tolerável se encontra abaixo do nível que pode ser mensurado por estudos epidemiológicos (BLUMENTHAL *et al.*, 2000; AMOAH *et al.*, 2018). Esta ferramenta será aplicada nesse estudo, utilizando como microrganismos alvos os helmintos, pois, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), entre os principais riscos à saúde associados ao uso dos bio sólidos com fins agrícolas, estão aqueles causados por ovos de helmintos, mais precisamente *Ascaris lumbricoides* (WHO, 1989).

Nesse contexto, o presente estudo teve por objetivo avaliar os riscos microbiológicos para os trabalhadores rurais, associados a ovos de helmintos (*Ascaris lumbricoides*), em função da aplicação de bio sólidos no solo, para culturas anuais, a partir de dados secundários de qualidade de lodos de Estações de Tratamento de Efluentes.

Este trabalho complementa os estudos realizados por Melo (2021) e Ferreira *et al.* (2022), em linha de pesquisa desenvolvida no Laboratório de Reúso de Águas – LRA, do Centro de Tecnologia da UFAL, sobre avaliação de riscos microbiológicos no uso agrônômico de bio sólidos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os riscos microbiológicos associados a ovos de helmintos, em função da aplicação de bio sólidos no solo, para culturas anuais, a partir de dados secundários de bio sólidos de Estações de Tratamento de Efluentes.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Utilizar a ferramenta AQRM (Avaliação Quantitativa de Riscos Microbiológicos) para estimar a probabilidade anual do risco de infecção por helmintos (*Ascaris lumbricoides*), para os trabalhadores envolvidos na aplicação de bio sólidos no solo e nas atividades de manejo durante o cultivo de culturas anuais, em larga escala;
- Confrontar os riscos anuais calculados com os riscos de infecção considerados toleráveis pela Organização Mundial da Saúde (OMS);
- Confrontar os resultados com os padrões brasileiros adotados para aplicação de bio sólido no solo (Resolução CONAMA nº 498/2020), bem como padrões internacionais (U.S. EPA, 1993 e WHO, 2006).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 LODO DE ESGOTO E BIOSSÓLIDOS

Segundo Andreoli *et al.* (2001), lodos de esgotos são resíduos do tratamento de esgotos sanitários que se apresentam em forma líquida ou semissólida, dependendo da operação e processo utilizados, e com teores de sólidos totais entre 0,25 e 12%. Esses resíduos podem ser gerados após os processos de tratamento primário, então são chamados de lodo primário, ou após os processos de tratamento biológico, sendo chamado de lodo secundário.

O aproveitamento do lodo de esgoto como fertilizante e/ou condicionador de solos tem se tornado uma alternativa de grande interesse técnico e econômico em todo o mundo para manejo desse subproduto do tratamento de esgoto. Cabe ressaltar que para efetivação de tais usos, o lodo de esgoto deve ser submetido a processos de beneficiamento ou tratamento, sendo transformado em bio sólido, um produto seguro do ponto de vista ambiental e de saúde pública e, portanto, passível de aplicação em solos (BARROS *et al.*, 2021).

A rota de destinação final do lodo constitui um dos principais pilares do tratamento sustentável dos esgotos, pois proporciona, ao mesmo tempo, a reciclagem de nutrientes essenciais às plantas e a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, devido ao alto teor de matéria orgânica presente no lodo (KIRCHMANN *et al.*, 2017; BATISTA; SOUZA, 2020).

Cabe destacar o potencial uso benéfico do material, tendo em vista a quantidade de matéria orgânica, nutrientes, umidade e outras qualidades que os bio sólidos possam conter, ao invés de ser considerado apenas um resíduo a ser disposto, por exemplo, por incineração ou aterramento sanitário (NEBRA, 2007; DIAS, 2012; MAGALHÃES, 2012). Outros constituintes do lodo são os metais pesados e os microrganismos, que têm sua quantidade variada em função de diversos fatores, como as características do efluente, tipo de tratamento empregado e produtos químicos utilizados (MAGALHÃES, 2012).

Na perspectiva de aproveitamento em solos, o bio sólido pode ser aplicado tanto em áreas agrícolas (incluindo pastagens e silvicultura) quanto em áreas degradadas. Em que pese as semelhanças entre as duas formas de aproveitamento, é de suma importância a diferenciação entre ambas, especialmente no que tange aos

critérios e condições que devem ser observados para cada um desses casos, conforme estabelecido na Resolução CONAMA nº 498/2020 (BARROS *et al.*, 2021).

3.2 TRATAMENTO DO LODO

Estima-se que o gerenciamento do lodo possa representar até 60% dos custos operacionais de uma ETE (ANDREOLI *et al.*, 2001). Por este motivo, seu tratamento é uma preocupação que se restringe, em muitos casos, somente à estabilização e ao desaguamento, para se atingir um teor de sólidos totais na faixa de 15% a 40%, visando quase que exclusivamente a redução dos volumes de lodo antes da sua retirada da área da ETE. No entanto, esta prática pode acarretar muitas vezes em negligência quanto às etapas de planejamento e execução do destino desse subproduto (MOREIRA *et al.*, 2019; BARROS *et al.*, 2021).

Assim, para um descarte seguro do lodo de esgoto, três aspectos precisam ser considerados: (i) o nível de estabilização da matéria orgânica, (ii) os teores de metais pesados e (iii) o grau de patogenicidade do lodo (CASSINI *et al.*, 2003; KACPRZAK *et al.*, 2017; BARROS *et al.*, 2021). Visando alcançar uma destinação segura, é preciso que o lodo passe por uma série de etapas de tratamento que estão descritas de forma resumida no Quadro 1.

Quadro 1: Métodos para tratamento de lodo

Tratamento	Descrição
Adensamento	Processo utilizado para remoção de umidade e, conseqüente, redução do volume da massa de lodo, facilitando assim as etapas subsequentes do seu tratamento. É uma etapa mais aplicada aos lodos primários e naqueles gerados pelos sistemas de lodos ativados e filtros percoladores. Os principais processos são: adensamento por gravidade, aplicado em lodos primários e mistos; flotação por ar dissolvido, utilizado em lodos ativados; centrifugação, aplicada em lodos biológicos aeróbios ou anaeróbios.
Estabilização	Etapa indicada para remoção da matéria orgânica e conseqüente redução de odores. Os processos de estabilização podem ser divididos em: biológico, por digestão aeróbia ou anaeróbias; químico, por oxidação química da matéria orgânica, através da adição de produtos químicos; térmico, por adição de calor sobre a fração volátil do lodo.
Condicionamento	Etapa de preparação para a desidratação, realizada predominantemente pela adição de produtos químicos (os mais usados são a cal e o cloreto férrico) ou tratamento térmico (atualmente ainda limitado). O principal objetivo do condicionamento é aumentar o tamanho das partículas de sólidos, por meio das fases de coagulação e floculação.

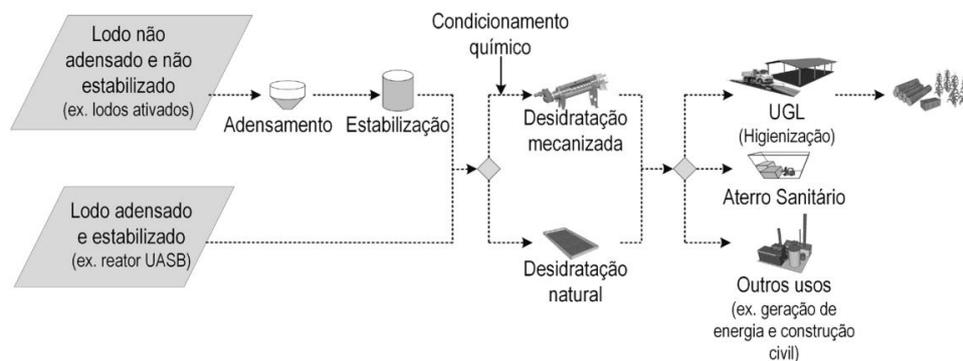
Desaguamento	Etapa de remoção de umidade e redução do volume de lodo, produzindo um material com comportamento mecânico próximo ao dos sólidos. O desaguamento pode ser realizado por meios naturais, mecânicos ou térmicos. Os meios naturais fazem o uso da evaporação e da percolação com principais mecanismos de remoção da água, e são realizados em lagoas de lodo ou leitos de secagem. Os meios mecânicos são baseados em mecanismos como a filtração, a compactação ou a centrifugação para acelerar o desaguamento do lodo. Na modalidade mecanizada, são utilizados filtros prensa, filtros a vácuo, prensas desaguadoras e centrífugas. Os meios térmicos são empregados para desaguamento, mas também servem simultaneamente para a estabilização da matéria orgânica e higienização do lodo, com o uso de calor em geral produzido por biogás de reatores anaeróbios da própria ETE.
Higienização	A higienização tem o objetivo de eliminar ou reduzir a concentração de organismos patogênicos e se torna necessária para se transformar o lodo em um bio-sólido para uso agrícola ou recuperação de áreas degradadas. Os processos de higienização combinam mecanismos térmicos, químicos e/ou biológicos para minimizar o grau de patogenicidade do lodo. Os métodos de higienização mais conhecidos e considerados eficazes na remoção de microrganismos patogênicos são a compostagem, caleação e secagem térmica do lodo.

Fonte: Adaptado de Barros *et al.* (2021).

Apesar das inúmeras tecnologias disponíveis para tratamento e gerenciamento do lodo, no Brasil, na maioria dos cenários o tratamento se restringe à estabilização e ao desaguamento. Logo, na maior parte dos casos o lodo não é transformado em bio-sólido para possibilitar seu aproveitamento no solo. Porém, com a aprovação da Resolução CONAMA nº 498/2020, que consiste em uma versão atualizada da CONAMA nº 375/2006, ampliando as oportunidades de uso de lodo de esgoto em solos, é de se esperar que os prestadores de serviço de saneamento passem a incluir a etapa de higienização do lodo, integrada a uma Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL), ao fluxograma de tratamento da fase sólida de suas ETEs (BARROS *et al.*, 2021).

A Figura 1 mostra as principais etapas e alternativas para o gerenciamento dos subprodutos sólidos do tratamento de esgoto, com destaque para a transformação do lodo em bio-sólido para uso no solo.

Figura 1: Principais etapas e alternativas para o gerenciamento do lodo gerado em ETEs.



Fonte: Barros *et al.* (2021).

3.3 EXPERIÊNCIAS BRASILEIRAS DE USO DE BIOSSÓLIDO EM SOLO

No Paraná, entre 2007 e 2017, foram aplicadas em 15.423 hectares de áreas agrícolas, 285.836 toneladas de biossólido (equivalente a 130.895 t ST), proveniente de lodo de esgoto tratado por processo de estabilização alcalina prolongada (EAP), a uma dose média de aplicação de $8,5 \text{ t ST} \cdot \text{ha}^{-1}$. O material foi aplicado em cultivos de cevada, feijão, café, milho, eucalipto, pinus, implantação de grama, adubação verde, implantação e pós-colheita de fruteiras de caroço, amora para bichos-da-seda, aveia, citros (laranja, pokan, limão Taiti), noz-pecã, seringueira, azevém, soja, cana-de-açúcar e trigo, beneficiando 290 agricultores em 81 municípios (BITTENCOURT, 2018). Na Tabela 1 estão indicadas as características do biossólido, destinado na forma de lotes, no Paraná.

Tabela 1: Parâmetros agronômicos, substâncias químicas e qualidade microbiológica de lotes de biossólido destinados para uso agrícola no Paraná, em 2017 e 2018.

	Parâmetro	Unidade	Média ^(a)	Desvio Padrão	Classe 1 CONAMA nº498/20
Parâmetro Agronômicos	pH _{H2O}	-	11	1	
	Sólidos Totais (ST)	%	64	15	
	Sólidos Voláteis Totais (SVT)		25	7	
	Carbono orgânico		9	4	
	N Kjeldahl		1,1	0,4	
	Nitrogênio amoniacal	% ST	0,02	0,04	
	Nitrogênio		0,04	0,1	
	Fósforo		0,3	0,1	
	Potássio		0,07	0,03	
	Cálcio		10	2	

	Magnésio		5	2	
	Enxofre		1,1	0,4	
Substâncias Químicas	Sódio		0,03	0,02	41
	Arsênio		6	1	1300
	Bário		208	95	39
	Cádmio		6	-	300
	Chumbo		24	11	1500
	Cobre		117	72	1000
	Cromo	mg.kg ⁻¹ ST	32	31	17
	Mercúrio		0,4	0,3	50
	Molibdênio		7	2	420
	Níquel		21	26	36
	Selênio		6	-	2800
		Zinco		387	143
Qualidade Microbiológica	Coliformes termotolerantes	NMP.g ⁻¹ ST ^(b)	3	15	
	Ovos viáveis de helmintos	Ovo.g ⁻¹ ST	<0,1	0	
	Salmonella sp	NMP.4 ⁻¹ .g ⁻¹ ST	Ausência	0	
	Vírus	UFF ou UFP.g ⁻¹ ST ^(c)	<0,25	-	

Fonte: Adaptado de Bittencourt *et al.* (2021a). Notas: Número de lotes analisados: 93. ^(a) Para o cálculo da média, utilizou-se o limite de quantificação (LQ) para resultado < 6 mg.kg⁻¹ ST; Cr, Cu e Pb < 20 mg.kg⁻¹ ST; Hg < 0,2 mg.kg⁻¹ ST; Ni < 10 mg.kg⁻¹ ST; Ba e Zn < 100 mg.kg⁻¹ ST; coliformes < 0,1 NMP.g⁻¹ ST). ^(b) NMP.g⁻¹ ST: número mais provável por grama de sólidos totais. ^(c) UFF ou UFP.g⁻¹ ST: unidade formadora de foco ou unidade formadora de placa por grama de sólidos totais.

Ainda que essa experiência seja anterior à publicação da Resolução CONAMA nº 498/ 2020, é possível observar (Tabela 1) que a média das concentrações das substâncias químicas se apresenta significativamente inferior aos limites da Resolução CONAMA nº 498/2020 para biossólido Classe 1 (BRASIL, 2020). Isso se deve ao esgoto afluente às estações de tratamento de esgoto (ETE) ser proveniente de áreas de baixa atividade industrial e aos critérios utilizados pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) para recebimento de efluentes não domésticos, acarretando um lodo com menores concentrações de substâncias químicas (BITTENCOURT *et al.*, 2021a).

Já em São Paulo, as experiências mais recentes de uso de biossólido em solo são nos municípios de Botucatu, Matão e Jundiaí. Em 2018, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) concedeu à ETE Lageado, em Botucatu, os registros de estabelecimento produtor de insumo agrícola e de produto fertilizante orgânico composto Classe D obtido a partir de tratamento de lodo por um sistema de secagem e compostagem em estufa (Figura 2). As garantias do produto descritas no registro são de 3% de nitrogênio total, pH igual a 6, relação máxima de Carbono/Nitrogênio (C/N) de 6, capacidade de troca de cátions (CTC) de 400 mmol

·kg⁻¹, 20% de carbono orgânico total, umidade máxima de 50% e 10% de relação mínima de CTC/C (BITTENCOURT *et al.*, 2021a).

Figura 2: Sistema de secagem e compostagem em estufa, ETE Lageado, Botucatu, SP.



Fonte: Silva *et al.* (2017).

A aplicação de biossólidos no solo deve ser avaliada sob vários aspectos considerando as especificidades locais. Bittencourt *et al.* (2021a) listam os principais desafios que, se não considerados e contornados, podem dificultar ou mesmo inviabilizar o uso agrícola de biossólidos, sendo estes: (i) Infraestrutura; (ii) Características do setor agrícola; (iii) Articulação junto aos produtores rurais; (iv) Aceitação pública.

3.3.1 MICROGARNISMOS INDICADORES

A estratégia clássica utilizada desde o início do século XX para a avaliação da contaminação de origem fecal é a análise de indicadores bacterianos, os quais estão presentes em quantidades elevadas nas fezes de humanos e de animais homeotermos, evidenciando a possibilidade da presença de microrganismos patogênicos de transmissão fecal-oral, causadores de doenças infecciosas como as gastroenterites. Utilizam-se as bactérias do grupo coliforme, especialmente *Escherichia coli*, cuja presença indica contaminação fecal em amostras de água e em

seus processos de tratamento e de desinfecção, em alimentos e em seus processos de manipulação e elaboração, e em resíduos sólidos e líquidos (IGNOTO, 2010).

Entretanto, a ausência desses indicadores não garante que patógenos, dentre eles, bactérias, esporos de fungos, ovos de helmintos, cistos/ocistos de protozoários e vírus, não estejam presentes. Dessa forma, a análise da presença desses indicadores não é suficiente para proteger a saúde humana de infecções e doenças (HAAS *et al.*, 1999; IGNOTO, 2010).

Levando em consideração a diversidade de microrganismos patogênicos em bio-sólidos, nesse estudo foram adotados como microrganismos alvos os helmintos, em especial os helmintos da espécie *Ascaris lumbricoides*, cujos detalhes serão abordados na seção seguinte.

3.3.2 MICRORGANISMOS ALVO: HELMINTOS

Os helmintos, considerados patogênicos aos seres humanos, pertencem aos filos Platyelminthes e Aschelminthes, sendo os trematóides e cestóides pertencentes ao primeiro grupo supracitado e os nematóides ao segundo. A presença dos ovos e, ou, larvas no lodo de esgotos é motivo de grande preocupação devido à alta sobrevivência no solo e baixas doses infectantes, bastando um único ovo ou larva para desencadear um processo infeccioso (MAGALHÃES, 2012). O ciclo biológico da maioria desses organismos compreende a ingestão de ovos ou larvas, o desenvolvimento e a reprodução no organismo do hospedeiro, a produção de ovos, e, finalmente, o desenvolvimento de larvas ainda no hospedeiro e, ou, a excreção de ovos e, ou, larvas junto às fezes (BASTOS *et al.*, 2013).

Conforme Hays (1977) os helmintos despertam grande interesse, pois o ambiente encontrado nos processos de tratamento de esgotos é propício ao embrionamento de seus ovos. Entre os helmintos estão inclusos vários vermes que são parasitas importantes para humanos, animais e plantas. Muitos desses microrganismos são transmitidos através de dejetos humanos e animais e, em ambientes adequados, os ovos de helmintos podem sobreviver no solo por vários anos, como os ovos de *Ascaris lumbricoides*, que podem permanecer infecciosos por até sete anos (GERARDI; ZIMMERMAN, 2004).

3.3.3 *Ascaris lumbricoides*

De acordo com Dias (2012), as informações disponíveis sobre helmintos em bioossólidos e no solo são, preponderantemente, sobre *Ascaris*, devido à maior prevalência desse organismo em comparação a outros helmintos

A sobrevivência de ovos de *Ascaris* pode variar entre 20 meses e seis anos quando todos são armazenados em lagoas ou submetidos a processos de tratamento como compostagem e digestão anaeróbia ou aeróbia (GASPARD *et al.*, 1997; O'DONNELL *et al.*, 1984; SANGUINETTI *et al.*, 2005 apud MAGALHÃES, 2012).

A ascaridíase é uma doença de transmissão fecal-oral, sendo alguns dos principais modos de transmissão relativos ao uso agrícola de bioossólidos a ingestão durante práticas agrícolas e o consumo de alimentos contaminados (MAGALHÃES, 2012).

3.4 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS MICROBIOLÓGICOS

A avaliação de risco pode ser definida amplamente como o processo de estimar a probabilidade de ocorrência de um evento e a magnitude provável dos efeitos adversos na segurança, saúde, ecologia ou finanças durante um período especificado (METCALF; EDDY, 2007).

Avaliação Quantitativa de Risco - AQR foi originalmente concebida para a exposição a substâncias químicas (Avaliação Quantitativa de Risco Químico), mas tem sido adaptada para a exposição a agentes microbianos (Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico), inclusive servindo de subsídios à formulação de normas e critérios relacionados à qualidade de água para consumo humano e de uso agrícola de bioossólidos (MAGALHÃES, 2012).

Magalhães (2012), evidencia que os modelos de exposição descrevem cenários com base nos quais são estimadas as doses de patógenos ingeridas a cada evento de exposição. É preciso estabelecer, previamente, os grupos de risco associados a tal prática e compreender a dinâmica dos patógenos desde a aplicação até o possível contato do material contaminado com esses indivíduos.

A AQRM é um modelo matemático que envolve quatro etapas: (i) identificação do perigo; (ii) avaliação da exposição; (iii) avaliação da dose resposta; (iv) caracterização do risco. (HAAS *et al.*, 1999).

A primeira etapa compreende a identificação do agente ou situação que possa representar ou introduzir um perigo e dos respectivos efeitos adversos à saúde. Nessa etapa, todos os perigos e eventos perigosos associados à prática que se deseje

estudar devem ser mapeados. Devem ser identificadas as fontes de contaminação, bem como os organismos patogênicos de maior ocorrência e importância (MAGALHÃES, 2012).

A etapa seguinte (avaliação da exposição) compreende a determinação da dose ingerida do agente a cada evento de exposição, bem como da frequência e duração das prováveis vias de exposição.

Em seguida, procede-se à avaliação da dose-resposta, etapa que envolve uma caracterização matemática da associação entre a dose ingerida e a probabilidade de infecção ou doença na população exposta. Para este fim são utilizados os modelos de análise dose-resposta, que são funções matemáticas que utilizam como argumento uma medida de dose para fornecer a probabilidade de ocorrência de um determinado efeito adverso, medido de zero (efeito nulo) a um (ocorrência completa do estado adverso).

Por fim, a caracterização do risco combina as informações disponíveis sobre exposição e dose-resposta, de forma a estimar (quantitativamente e em termos probabilísticos) os riscos decorrentes da exposição continuada a determinado agente (HAAS *et al.*, 1999; MAGALHÃES, 2012).

Em resumo, a AQRM permite estimar riscos à saúde com base em modelos de exposição e modelos dose-resposta. Essas informações sobre a relação dose-resposta de patógenos entéricos de origem hídrica e alimentar é um componente importante em qualquer estudo sobre os riscos à saúde associados à reutilização de águas residuárias e lodo proveniente do tratamento de esgotos para a produção de culturas alimentares (NAVARRO *et al.*, 2010; MAGALHÃES, 2012).

3.5 IMPORTÂNCIA DA FERRAMENTA AQRM PARA FORMULAÇÃO DAS LEGISLAÇÕES

Segundo Blumenthal *et al.* (2000), reconhecem-se as seguintes abordagens para o estabelecimento de critérios de qualidade para diversos usos da água, e por extensão de biossólidos: (i) a ausência de riscos potenciais (perigos), caracterizada pela ausência de organismos indicadores e, ou, patogênicos na água ou nos biossólidos; (ii) a medida de risco atribuível à utilização da água, ou de biossólidos, dentre uma população exposta; (iii) a estimativa do risco atribuível mediante o emprego de modelos probabilísticos. Assim, a metodologia de Avaliação Quantitativa

de Risco Microbiológico (AQRM), de forma conjunta aos estudos epidemiológicos clássicos, tem subsidiado a formulação ou a discussão sobre normas e critérios de qualidade da água e de biossólidos (BASTOS *et al.*, 2009).

A AQRM também pode ser usada de forma inversa, pois possibilita estabelecer padrões de concentrações de patógenos no ambiente (água, efluentes tratados, biossólidos, dentre outros) a partir dos riscos considerados aceitáveis ou toleráveis para a saúde, e dessa forma, cumpre um papel importante na formulação de políticas públicas e gestão de riscos.

3.6 ASPECTOS LEGAIS RELACIONADOS AO GERENCIAMENTO DO LODO E USO DE BIOSSÓLIDOS

O gerenciamento do lodo é uma atividade complexa e de grande importância nas ETEs, por extrapolar seus limites e envolver outros setores da sociedade e do saneamento básico. Além disso, o descarte inadequado desse subproduto acarreta problemas que podem comprometer o meio ambiente e, conseqüentemente, a saúde humana e animal. Diante desses fatos, faz-se necessário instituir dispositivos legais que disciplinem as condições adequadas de gerenciamento desse subproduto, notadamente no que tange ao tratamento, monitoramento das características do biossólido (lodo de esgoto pós-beneficiamento) e sua destinação final (BARROS *et al.*, 2021).

De acordo com os critérios da Norma Brasileira – NBR 10.004/2004 (ABNT, 2004) o lodo gerado em ETEs (sem presença significativa de efluente industrial) é classificado como Resíduo Classe II A – não inerte. A norma estabelece que os Resíduos Classe II A podem ter propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. A NBR não classifica os resíduos gerados nas ETEs quanto à patogenicidade, que é um dos critérios utilizados para classificação de Resíduos Sólido Classe 1 – perigosos.

Segundo a Lei Federal nº 12.305/2010, que instruiu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), os resíduos sólidos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, como o lodo, são classificados como resíduos dos serviços públicos de saneamento básico (BRASIL, 2010). Por apresentar características que o tornam um ótimo condicionante de solos, o lodo se enquadra nos princípios de reciclagem e reutilização de resíduos e desenvolvimento sustentável.

Conforme Santos (2001), para se garantir a segurança ambiental e sanitária, o uso do bio sólido deve ser apoiado por uma legislação que regulamente essa etapa final do gerenciamento do lodo produzidos nas ETEs, a fim de estabelecer quais contaminantes devem ser monitorados, quais as concentrações que serão toleradas, em função de cada uso, qual a frequência de avaliação técnica do bio sólido e quais as alternativas de disposição que serão permitidas em função da qualidade do material.

A regulamentação para o reúso agrícola de lodos de esgotos envolve o estabelecimento de padrões de qualidade dos bio sólidos (químicos e, ou microbiológicos), aliados a restrições de uso, visando a proteção à saúde humana, tanto de consumidores de produtos cultivados com bio sólidos, quanto de trabalhadores em contato direto com bio sólidos (DIAS, 2012).

Com objetivo de avaliar criticamente os padrões adotados nas regulamentações sobre uso agrícola de bio sólidos, sob a perspectiva da análise de microrganismos dos grupos de helmintos, foram abordados nesse estudo as regulamentações dos EUA (U.S EPA, 1993), da OMS (WHO, 2006) e do Brasil (CONAMA, 2020).

3.6.1 PADRÕES INTERNACIONAIS

Em 1993, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) estabeleceu os padrões de uso de lodos de esgoto no país por meio da norma referenciada como “Norma 503” (USEPA, 1993), se tornando uma das mais representativas e influentes no cenário mundial. No que se refere a qualidade microbiológica, a norma define duas classes de bio sólidos (Classe A e B) de acordo com o nível/redução de patógenos alcançáveis através das técnicas de tratamento especificadas pela própria norma.

Os bio sólidos Classe A são produzidos por Processos de Redução Adicional de Patógenos (PRAP) e devem conter uma concentração de ovos viáveis de helmintos menor que 1 ovo por 4 gramas de ST. Os PRAP de lodo citados na Norma 503 incluem: compostagem, secagem térmica, tratamento térmico, digestão aeróbica termofílica, irradiação com raios beta, pasteurização. Para a produção de bio sólidos Classe B, o lodo deve ser submetido a “Processos de Redução Significativa de Patógenos” (PRSP), porém, não é especificado o padrão de qualidade microbiológica em termo de ovos de helmintos para essa categoria (MAGALHÃES, 2012).

Em termos da qualidade microbiológica, bioossólidos Classe A podem ser utilizados sem quaisquer restrições, da mesma forma que qualquer outro fertilizante ou produto de correção de solo, incluindo a aplicação em gramados e jardins residenciais. Essas últimas opções de uso não são permitidas para os bioossólidos Classe B, os quais, no entanto, podem ser aplicados em grande escala em solos agrícolas e florestais, em áreas de recuperação e em locais públicos, desde que sejam observadas as restrições descritas na Norma 503 (US EPA, 1993; MAGALHÃES, 2012):

3.6.2 PADRÕES NACIONAIS

A Resolução CONAMA nº 498/2020 define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bioossólido em solos, revogando e substituindo a Resolução CONAMA nº 375/2006. A antiga Resolução nº 375/2006 trazia muitas inconsistências e dificuldades para a disseminação do uso agrícola de lodo de esgoto no Brasil. Diante disso, em um processo coordenado pela Câmara Temática de Tratamento de Esgotos da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES) e Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia (INCT) ETEs Sustentáveis, foi construída uma nova proposta de regulamentação, contando com a participação de diversos atores ligados ao setor de saneamento ambiental, incluindo representantes de empresas operadoras públicas e privadas, da academia e de órgãos reguladores (BITTENCOURT *et al.*, 2021b).

A Resolução classifica os bioossólidos em Classe A ou Classe B, quanto à qualidade microbiológica, e em Classe 1 ou Classe 2, de acordo com os valores máximos permitidos de substâncias químicas. Dessa forma, o Brasil passou a adotar como padrão de bioossólido Classe A menos de 1 ovo viável de helminto por grama de Sólidos Totais (ST) (BRASIL, 2020). Os bioossólidos Classe A podem ser aplicados em qualquer cultura, porém, a Resolução CONAMA nº 498/2020 restringe que para o cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo, não se deve aplicar o bioossólido um mês antes do período de colheita.

A resolução não especifica o padrão de qualidade microbiológica associada a ovos de helmintos para os bioossólidos Classe B e somente podem ser aplicados em cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus, em produtos não alimentícios, pastagens, forrageiras e árvores frutíferas desde que sejam incorporados

ao solo mecanicamente e que sejam obedecidas as restrições de colheita e de acesso público.

3.6.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE OS DISPOSITIVOS REGULATÓRIOS VIGENTES

A resolução brasileira mantém sintonia com algumas das principais referências de regulamentação no cenário internacional, como por exemplo, a norma vigente nos EUA (US EPA, 1993). A norma, assim como na regulamentação dos EUA, mantém a abordagem de dupla barreira de proteção à saúde (tratamento de lodo e restrições de uso) dois níveis de qualidade microbiológica de biossólido (Classes A e B), para os quais são estabelecidas diferentes restrições de aplicação.

Para as duas classes de biossólido, as exigências de tratamento e de qualidade microbiológica expressas na Resolução CONAMA nº 498/2020 são praticamente as mesmas das citadas normas de referência internacional (BITTENCOURT *et al.*, 2021b). As restrições de uso (restrições de culturas, de método de aplicação e tempo a ser observado entre a aplicação e o cultivo, colheita ou pastejo) estabelecidas na nova Resolução estão calcadas em estudos de avaliação de risco (BASTOS *et al.*, 2009; MAGALHÃES, 2012; BITTENCOURT *et al.*, 2021b).

Os padrões adotados nas diretrizes da OMS em 2006 foram estabelecidos usando evidências epidemiológicas em vez de uma abordagem de avaliação de risco, como foi feito para outros parâmetros, sendo então limitadas pelo desempenho de diferentes métodos de tratamento de lodo, e não pela estimativa do risco real à saúde (NAVARRO *et al.*, 2009).

Na Tabela 2 estão dispostos os valores das concentrações adotadas como padrão de qualidade nos documentos abordados acima.

Tabela 2: Limites de concentrações de ovos de helmintos para utilização de biossólidos, conforme a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, Conselho Nacional de Meio Ambiente do Brasil e Organização Mundial da Saúde.

Norma 503, U.S EPA (1993)		Resolução CONAMA nº 498/2020		Diretrizes da OMS (2006)
Classe A	Classe B	Classe A	Classe B	
< 1 ovo/4g ST	Não especificado	< 1 ovo/g ST	Não especificado	1 ovo/g ST

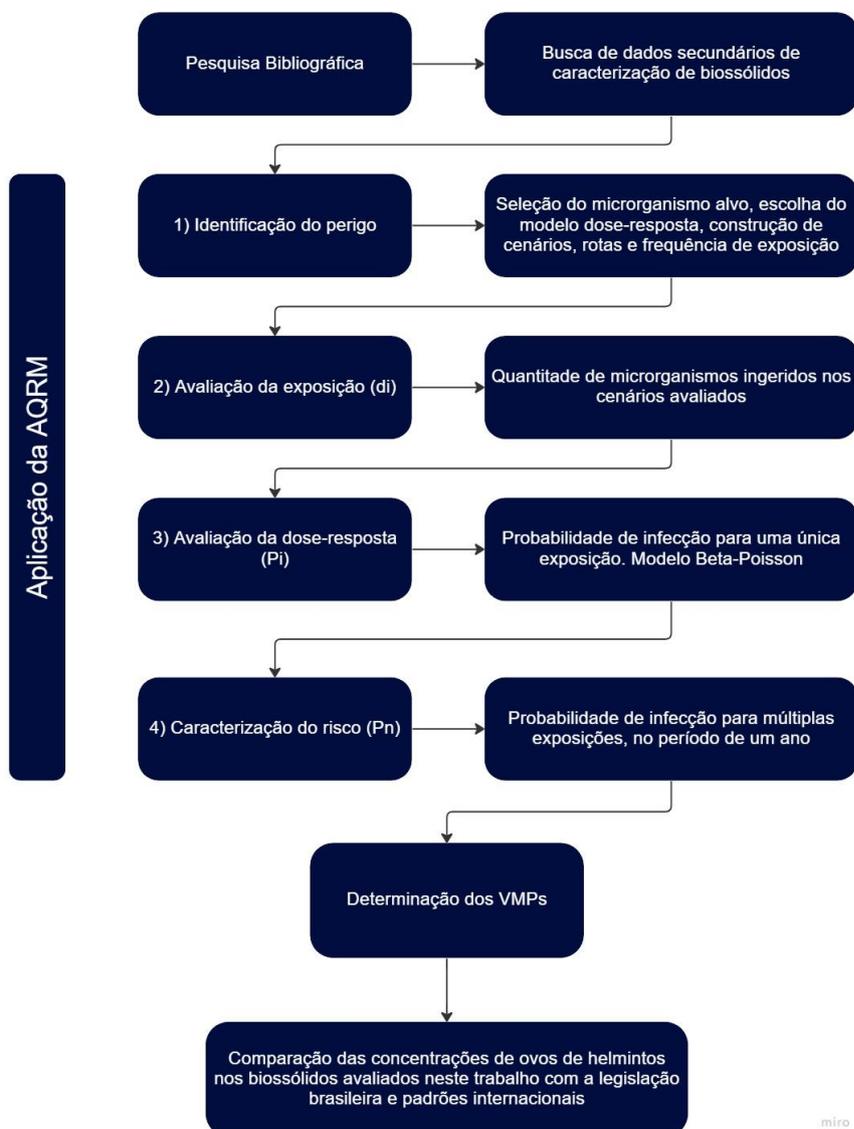
Fonte: US. EPA (1993), CONAMA (2020) e WHO (2006).

Notas: g ST = gramas por sólidos totais

4 MÉTODOS

A Figura 3 ilustra as etapas metodológicas adotadas do desenvolvimento do TCC.

Figura 3: Etapas da metodologia da pesquisa.



Fonte: Autor (2023).

4.1 DADOS DE BIOSSÓLIDO A SEREM AVALIADOS

A partir de pesquisas bibliográficas, os dados utilizados para a AQRM, referentes à concentração de ovos viáveis de helmintos, foram retirados do estudo desenvolvido por Batista e Souza (2020), onde os autores caracterizaram os processos de produção, tratamento e qualidade do lodo de esgoto gerado em sete ETEs de Brasília. Para utilização dos dados neste trabalho, foram selecionadas duas estações, ETE Gama e ETE Brasília Norte.

4.2 APLICAÇÃO DA AQRM

Para estimar a probabilidade de infecção para os trabalhadores rurais em função da aplicação de bio sólidos no solo e nas atividades de manejo durante o cultivo de culturas anuais, em larga escala, foram adotados os seguintes aspectos: culturas consideradas, população alvo e cenários avaliados.

4.2.1 CULTURAS CONSIDERADAS

Foram avaliadas na aplicação da ferramenta AQRM as culturas de cana-de-açúcar (gramínea) e feijão (legume), por serem culturas com diferentes modos de plantio e necessidades de nutrientes, o que permite analisar uma diversidade maior de cenários relacionados a esses vegetais. Além disso, são culturas amplamente desenvolvidas no estado de Alagoas, com 291.462 Hectares (Cana-de-açúcar) e 34.725 Hectares (Feijão) de área plantada no estado em 2021 (IBGE, 2023).

4.2.2 POPULAÇÃO ALVO

A população alvo do estudo são os trabalhadores em atividades de aplicação e manejo de bio sólidos no campo, envolvendo a possibilidade de transmissão de patógenos por inalação de aerossóis, contato com a pele ou ingestão de partículas de bio sólido ou de solo.

4.2.3 CENÁRIOS AVALIADOS

Avaliou-se dois cenários de exposição para trabalhadores rurais envolvidos em agricultura de culturas anuais em larga escala, cuja aplicação dos bio sólidos ocorre de forma mecanizada. O primeiro se refere a estimativa de riscos aos agricultores durante a aplicação do bio sólido (cenário 1) e o segundo para os trabalhadores envolvidos no manejo do sistema solo-planta (cenário 2).

4.3 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS MICROBIOLÓGICO

Para aplicação da ferramenta AQRM e determinação dos riscos de infecção por *Ascaris lumbricoides*, foi utilizada a abordagem sugerida pelo NRC (*National Research Council* – Conselho Nacional de Pesquisa dos Estados Unidos), abrangendo quatro etapas: (i) identificação e caracterização do perigo / formulação do problema; (ii) avaliação da exposição; (iii) análise da dose-resposta e (iv) caracterização de risco (WHO, 2016).

4.3.1 IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO

A seleção do microrganismo alvo deve considerar a sua concentração nos bioossólidos e nas culturas, consequências ao hospedeiro, vias de exposição consumo de alimentos em solo enriquecido com bioossólido e frequência de exposição. De acordo com Magalhães (2012), a identificação dos perigos associados à exposição durante o manejo do sistema solo-planta deve considerar, além da presença dos patógenos nos bioossólidos, fatores como a capacidade de multiplicação e sobrevivência desses organismos no ambiente (por exemplo, nos bioossólidos, no solo e nas plantas).

Nesse contexto, foi definido o microrganismo alvo do estudo, *A. lumbricoides*, tomando como base o fato de ser abundante nesses materiais, um potencial causador de doenças em seres humanos, ser indicativo direto da existência de outros organismos patogênicos e possuírem uma alta taxa de sobrevivência no solo. Além disso, a concentração de *Ascaris* pode ser considerada 90% dos ovos de helmintos encontrados nos alimentos cultivados em solo enriquecido com bioossólidos (JIMENEZ *et al.*, 2006; NAVARRO *et al.*, 2009).

4.3.2 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO

Nesta etapa deve-se estimar a quantidade de microrganismo ingerida por rota e frequência de exposição. Os cenários de exposição considerados foram: (i) a ingestão involuntária de partículas de bioossólidos por trabalhadores envolvidos nas atividades de aplicação e (ii) a ingestão involuntária de partículas de bioossólidos no manejo desse material no campo durante o cultivo em grandes propriedades. Para tal, foi empregadas as Equações 1 e 2 para estimar as doses de patógenos relativas a esses cenários, respectivamente (MAGALHÃES, 2012).

$$d_i = C_{ASC.bio\text{ss}} * M_{bio\text{ss}} \quad (\text{Eq.1})$$

$$d_i = C_{ASC.bio\text{ss}} * F_{dil.bio\text{ss}} * D_{ASC.solo} * M_{solo} \quad (\text{Eq.2})$$

Onde: d_i é a dose de patógenos ingerida a cada evento de exposição (número de organismos); $C_{ASC.bio\text{ss}}$ é concentração de microrganismo no bioossólido (em ovos viáveis de *Ascaris* / g bioossólidos); $F_{dil.bio\text{ss}}$ é o fator de diluição do bioossólido no solo (g bioossólido / g solo); $D_{ASC.solo}$ é decaimento dos patógenos no solo; $M_{bio\text{ss}}$ é a ingestão involuntária de bioossólidos pelos trabalhadores durante a aplicação (g);

M_{solo} é a ingestão acidental de partículas de solo pelos trabalhadores durante o cultivo (manejo solo-planta) (g).

Para estimar a dose ingerida por trabalhadores envolvidos em atividades de aplicação de bioossólidos e de manejo do sistema solo-planta, devem ser obtidas informações sobre as seguintes variáveis: (i) concentração de organismos patogênicos no bioossólido; (ii) taxas de aplicação de bioossólidos; (iii) decaimento natural dos patógenos no solo; (iv) modo de aplicação de bioossólidos (manual ou mecanizada); (v) ingestão acidental de partículas de bioossólido durante aplicação e (vi) ingestão acidental de partículas de solo durante o manejo do sistema solo-planta.

4.3.2.1 CONCENTRAÇÃO DE MICRORGANISMOS PATOGÊNICOS NO BIOSSÓLIDO

Os dados de caracterização microbiológica utilizados para aplicação da AQRM foram obtidos após pesquisa bibliográfica, conforme comentado anteriormente.

Devido à maior prevalência de *Ascaris lumbricoides* em comparação a outros helmintos, as informações disponíveis sobre esses organismos em bioossólidos e no solo são predominantemente sobre *Ascaris spp* (MAHALHÃES, 2012). Como foi abordado na revisão, de acordo com Navarro *et al.* (2009), os microrganismos da espécie *Ascaris lumbricoides* representam cerca de 90% do total de ovos de helmintos, sendo estas as concentrações utilizadas na avaliação de riscos microbiológicos

4.3.2.2 TAXAS DE APLICAÇÃO DE BIOSSÓLIDOS

A quantidade de lodo a ser aplicada é função da necessidade nutricional da espécie a ser cultivada, da qualidade agrônômica do bioossólido e das características do solo onde este será aplicado. Além disso, a fim de evitar riscos de lixiviação, a taxa de aplicação não deve superar a quantidade demandada pela cultura. Por outro lado, deve-se observar que os nutrientes muitas vezes não se apresentam na forma prontamente assimilável (MAGALHÃES, 2012). Na ausência de informações específicas, pode-se admitir que 50% dos nutrientes estariam disponíveis para a primeira cultura após a aplicação de bioossólidos (ANDREOLI *et al.*, 2001).

Fundamentado em informações sobre recomendações de adubação solo para culturas anuais, Magalhães (2012) estimou a quantidade de bioossólidos necessárias

para suprir a demanda de nutriente de diferentes culturas, considerando que a incorporação do material se daria a 20 cm de profundidade e em solo com densidade igual a 1,5 g/cm³. Portanto, os fatores médios de diluição em relação a incorporação do bio sólido no solo, de acordo com as recomendações de adubação de diferentes culturas anuais foram de 0,0028 grama de bio sólido por grama de solo para cana-de-açúcar e para o feijão (MAGALHÃES, 2012).

4.3.2.3 DECAIMENTO NATURAL DE MICRORGANISMOS PATOTÔNICOS NO SOLO

Pelo fato desses microrganismos serem muito resistentes em ambientes adequados, como os ovos de *Ascaris lumbricoides*, que permanecem infecciosos no solo por 2 a 7 anos (MAGALHÃES, 2012), a taxa de decaimento natural de microrganismos patogênicos no solo não foi considerada nos cálculos (Eq. 2). Da mesma forma, em seus estudos sobre AQRM aplicada ao uso agrícola de bio sólidos, Bastos *et al.* (2009), não consideram qualquer decaimento de ovos de helmintos, dado o conhecimento de sua prolongada sobrevivência no solo.

4.3.2.4 MODO DE APLICAÇÃO DE E INGESTÃO INVOLUNTÁRIA DE BIOSSÓLIDO PELOS TRABALHADORES RURAIS

Para a aplicação dos bio sólidos (cenário 1), considerou-se que na agricultura em larga escala (culturas anuais) a aplicação dos bio sólidos se daria mecanicamente e que o trabalhador estaria envolvido nessas atividades de uma a duas vezes por semana (50 a 100 dias por ano), com ingestão acidental de partículas de bio sólidos de 1 a 10 mg/dia (MAGALHÃES, 2012).

Durante o manejo e cultivo das culturas anuais (cenário 2) em larga escala, foi considerado que o manejo seria mecanizado e menos intenso, dessa forma, concluiu-se que um trabalhador estaria exposto de 50 a 100 vezes no ano e que em cada evento de exposição estaria sujeito à ingestão de 1 a 10 mg de solo (MAGALHÃES, 2012).

4.3.3 AVALIAÇÃO DA DOSE RESPOSTA

Essa etapa busca relacionar uma determinada dose do agente microbiológico decorrente de uma única exposição com o risco de uma resposta adversa infecciosa no indivíduo. O modelo dose-resposta escolhido foi o de Beta-Poisson pois leva em consideração as variações existentes nas interações patógeno-hospedeiro. O

modelo Beta-Poisson (Eq. 3) relaciona a dose ingerida do microrganismo e a probabilidade de infecção em uma única exposição, e é descrito por dois parâmetros base, a dose infectante média (N_{50}) e o parâmetro de decaimento α . A dose infectante também pode ser representada pela Eq. 4, em função de uma constante de proporcionalidade β (MAGALHÃES, 2012).

$$P_i = 1 - \left[1 + \left(\frac{d}{N_{50}} \right) * \left(2^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right) \right]^{-\alpha} \quad (\text{Eq.3})$$

$$N_{50} = \beta * \left(2^{\frac{1}{\alpha}} - 1 \right) \quad (\text{Eq.4})$$

A partir das Equações 3 e 4 o modelo dose-resposta pode ser simplificado na Equação 5:

$$P_i = 1 - \left(1 + \frac{d}{\beta} \right)^{-\alpha} \quad (\text{Eq.5})$$

Onde: P_i é a probabilidade de infecção para uma única exposição; d : dose ou número de patógenos ingeridos (Eq. 1 ou Eq. 2); N_{50} é a dose infectante média (Eq. 4); α e β são parâmetros dose-resposta, característicos da interação agente-hospedeiro.

Navarro *et al.* (2009) propuseram o ajuste de modelos Beta-Poisson a dados de dose-resposta de helmintos quando a via de exposição é a ingestão involuntária de partículas de solo irrigado com águas residuárias. Dessa forma, foram adotados como parâmetros da interação agente-hospedeiro para *Ascaris* $\alpha = 0,104$ e $\beta = 1,096$.

4.3.4 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO

A caracterização do risco consiste na combinação das informações sobre determinado cenário de exposição e da relação dose-resposta para expressar os riscos de infecção (a um dado agente patogênico) associados a uma população exposta a determinado perigo. Partindo do princípio de que cada evento de exposição é considerado independentemente, a estimativa da probabilidade de infecção devida a múltiplas exposições pode ser calculada de acordo com as premissas da distribuição binomial. Se a probabilidade de infecção para uma única exposição à dose d é dada por P_i , então a probabilidade de o indivíduo não ser infectado é $(1 - P_i)$; logo, para n exposições a probabilidade de não infecção é dada

por $(1 - P_i)^n$ e a probabilidade de infecção é dada pela Equação 6 (HAAS *et al.*, 1999; MAGALHÃES, 2012).

$$P_n = 1 - (1 - P_i)^n \quad (\text{Eq.6})$$

Onde: P_n é o risco anual; P_i a probabilidade de infecção do usuário para uma única exposição (Equação 5); n : número ou frequência de exposições no ano.

O período de um ano foi adotado a fim de que se possa comparar os resultados obtidos com os valores de referência da OMS.

Os riscos anuais calculados de infecção por *Ascaris lumbricoides*, para os diferentes cenários de exposição dos trabalhadores aos bio sólidos, foram comparados com os riscos toleráveis da OMS, determinado como descrito a seguir. DALY (da sigla inglesa DALYs – Disability Adjusted Life Years) é a métrica usada nas diretrizes da OMS para a carga de doença da comunidade, que significa “anos de vida perdidos ajustados por incapacidade”, que permite transformar uma “incapacidade vivenciada” em “anos de vida saudáveis perdidos”. Fornece um peso relativo diferente para patógenos com base na gravidade dos resultados da doença (WHO, 2016). Segundo Mara e Sleight (2010a), a OMS assume como carga de doença tolerável 1×10^{-6} DALY pppa (por pessoa por ano), e considera uma perda de $8,25 \times 10^{-3}$ DALY por casos de ascaridíase (CHAN, 1997). Tomando como pior cenário, uma proporção de doença/infecção por *Ascaris* de 1 (ou seja, todos aqueles infectados com *Ascaris* desenvolvem ascaridíase), o risco tolerável de infecção por *Ascaris* é dado pela Equação 7:

$$\frac{\text{DALY tolerável pppa (OMS)}}{\text{DALY por casos de ascaridíase}} = \frac{10^{-6}}{8,25 \times 10^{-3}} = 1,2 \times 10^{-4} \text{ pppa} \quad (\text{Eq.7})$$

Logo, 10^{-6} DALY pppa corresponde ao nível de risco tolerável anual de $1,2 \times 10^{-4}$ pppa para *Ascaris*, e que foi o valor usado como referência na análise dos resultados obtidos após a aplicação da AQRM.

4.4 DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÁXIMOS PERMITIDOS DE CONCENTRAÇÕES DE PATÓGENOS NOS BIOSSÓLIDOS PARA ATENDER AOS NÍVEIS DE RISCOS TOLERÁVEIS

Como abordado na fundamentação teórica, o modelo AQRM também pode ser usado de forma inversa, possibilitando estabelecer padrões de concentrações de

patógenos a partir de riscos considerados aceitáveis ou toleráveis. Deste modo, com intuito de reproduzir e avaliar as restrições impostas pela Resolução CONAMA 498/2020 (CONAMA, 2020), pelas diretrizes da OMS (WHO, 2006) e pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA, 1993) os modelos descritos no item 4.3 foram utilizados de forma inversa, partindo de um nível de risco tomado como tolerável/aceitável, foram calculadas as concentrações de patógenos no bio-sólido que resultariam nesses valores. O procedimento foi empregado a partir dos mesmos cenários de exposição considerados para aplicação da AQRM: (i) ingestão involuntária de partículas de bio-sólidos durante as atividades de plantio e adubação das culturas. (ii) ingestão de partículas de solo adubados com bio-sólidos durante as atividades de cultivo e manejo das culturas.

4.4.1 PROBABILIDADE DE INFECÇÃO TOLERÁVEL PARA EXPOSIÇÃO ÚNICA (P_i')

Considerando que o risco anual de infecção por *Ascaris* seja igual ao delimitado pela OMS para a utilização de esgotos sanitários de $1,2 \times 10^{-4}$ pppa, é possível calcular a probabilidade de infecção associada a uma única exposição (P_i') relacionada ao risco anual tolerável, de acordo com a Equação 8.

$$P_n = 1 - (1 - P_i)^n$$

$$P_i' = 1 - (1 - P_n)^{\frac{1}{n}} \quad (\text{Eq.8})$$

Onde: P_i' é a probabilidade de infecção tolerável para exposição única; P_n é o risco de infecção anual tolerável ($1,2 \times 10^{-4}$ pppa para *Ascaris*); n é o número ou frequência de exposições ao longo de um ano.

Dessa forma, a probabilidade de infecção tolerável para exposição única (P_i') será dada em função do número de exposições ao longo do período de um ano (n).

4.4.2 DOSE TOLERÁVEL POR EXPOSIÇÃO (D_i')

Adotando os mesmos valores de α e β (parâmetros advindos da interação agente-hospedeiro) da aplicação da AQRM (item 4.3.3) e a partir da Equação 5 (probabilidade de infecção por uma única exposição), é possível calcular a dose tolerável por exposição (d_i') através da equação a seguir (Equação 9).

$$P_i' = 1 - \left(1 + \frac{d_i'}{\beta}\right)^{-\alpha}$$

$$d_i' = \beta * ((1 - P_i')^{-\frac{1}{\alpha}} - 1) \quad (\text{Eq.9})$$

Onde: d_i' é a dose tolerável de patógenos ingeridos; P_i' é a probabilidade de infecção tolerável para uma única exposição; α e β são parâmetros oriundos da interação agente-hospedeiro.

4.4.3 CONCENTRAÇÃO TOLERÁVEL DE ASCARIS EM BIOSSÓLIDOS ($C_{ASC.BIOSLD}'$)

A dose infectante por exposição foi calculada na aplicação da AQRM através das Equações 1 e 2, para os respectivos cenários 1 e 2 abordados neste estudo. A partir dessas equações é possível determinar a concentração tolerável de *Ascaris* em bioossólidos $C_{ASC.bioss.}'$ (Equações 10 e 11) para as culturas de cana-de-açúcar e feijão, baseado nas mesmas variáveis definidas no item 4.3.2 utilizadas para estimar a dose de patógenos ingerida a cada evento de exposição.

$$d_i' = C_{ASC.bioss.}' * M_{bioss}$$

$$C_{ASC.bioss.}' = \frac{d_i'}{M_{bioss}} \quad (\text{Eq.10})$$

$$d_i = C_{ASC.bioss.} * F_{dil.bioss} * D_{ASC.solo} * M_{solo}$$

$$C_{ASC.bioss.}' = \frac{d_i'}{F_{dil.bioss} * D_{ASC.solo} * M_{solo}} \quad (\text{Eq.11})$$

4.5 DISCUSSÃO SOBRE OS VALORES ADOTADOS POR LEGISLAÇÕES

Após aplicar o modelo AQRM para estimar os riscos de infecções anuais e calcular as concentrações de *Ascaris* que resultariam em níveis de riscos toleráveis para a utilização de bioossólidos em solos agrícolas, os resultados obtidos foram comparados com os valores adotados como referência pelas normas e legislações pertinentes citadas no item 3.6.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DADOS DE BIOSSÓLIDOS AVALIADOS

Na Tabela 3 estão representadas as concentrações de ovos viáveis de helmintos obtidas pelo estudo conduzido por Batista e Souza (2020).

Tabela 3: Médias e desvios padrões de concentração de ovos viáveis de helmintos por grama de matéria seca

Biossólido	Nº de ovos viáveis de helmintos/g matéria seca
ETE Gama	8,25 ± 6,54
ETE Brasília Norte	1,19 ± 0,97

Fonte: Adaptado de Batista e Souza (2020).

A ETE Gama possui sistema de tratamento com Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente (RAFA), reator biológico e clarificador. O lodo produzido na estação passa por um processo de adensamento, condicionamento químico e desaguamento. A tecnologia de tratamento empregada na ETE Brasília Norte consiste em sistema com Remoção Biológica de Nutrientes (RBN) e polimento final. O lodo produzido na estação passa por um processo de adensamento, estabilização, condicionamento químico e desaguamento (BATISTA; SOUZA, 2020).

5.1.1 CONCENTRAÇÃO DE OVOS VIÁVEIS DE *ASCARIS LUMBRICOIDES*

Como apresentado anteriormente, conforme Jimenez *et al.* (2006) e Navarro *et al.* (2009) a concentração de *Ascaris lumbricoides* pode ser considerada 90% dos ovos de helmintos encontrados nos alimentos cultivados em solos enriquecidos com biossólidos. Tomando como base 90% das concentrações médias do número de ovos viáveis de helmintos nos biossólidos produzidos pela ETE Gama e ETE Brasília Norte, foram determinadas as concentrações de ovos viáveis de *Ascaris*, indicadas na Tabela 4.

Tabela 4: Concentrações de ovos viáveis de *Ascaris* por gramas de sólidos totais.

Biossólido	Nº de ovos viáveis de helmintos/g matéria seca	Nº de ovos viáveis de <i>Ascaris</i> /g matéria seca
ETE Gama	8,25 ± 6,54	7,43
ETE Brasília Norte	1,19 ± 0,97	1,07

Fonte: Autor (2023).

5.2 ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCOS MICROBIOLÓGICOS

O modelo AQRM proposto foi utilizado para a estimativa de risco aos trabalhadores envolvidos em atividades de aplicação e manejo dos bioossólidos produzidos pelas ETEs em estudo.

5.2.1 IDENTIFICAÇÃO DO PERIGO

Os microrganismos alvo contemplados nesta pesquisa foram os helmintos da espécie *Ascaris lumbricoides*, por serem considerados indicadores da presença de outros microrganismos patogênicos, devido a sua alta resistência às condições ambientais adversas e a ocorrência frequente em amostras de lodos e bioossólidos.

5.2.2 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO

As doses de microrganismos ingeridas por rota e frequência de exposição foram calculadas de acordo com os modelos expressos pelas Equações 1 e 2, em função dos cenários avaliados e da concentração de patógenos nos bioossólidos.

As variáveis dos modelos de exposição foram definidas como descrito abaixo:

- Concentração de organismos patogênicos no bioossólido: concentração de ovos viáveis de *Ascaris* por grama de matéria seca conforme, Tabela 4;
- Fator de diluição por incorporação do bioossólido ao solo: determinado em função das necessidades nutricionais de cada cultura (MAGALHÃES, 2012);
- Decaimento dos microrganismos patogênicos no solo: o decaimento dos patógenos no solo ($D_{ASC.solo}$) não foi considerado nos cálculos da dose, uma vez que o ciclo de cultivo do feijão e da cana-de-açúcar são muito curtos em relação ao período que os ovos de *Ascaris* podem permanecer infecciosos, que é de aproximadamente 7 anos, o que torna irrelevante a taxa de decaimento para os cálculos (US.EPA, 2003; BASTOS *et al.*, 2009; MAGALHÃES, 2012).
- Ingestão involuntária de bioossólidos pelos trabalhadores durante a aplicação e cultivo das culturas (M_{biooss} e M_{solo}): foram adotadas com base nos dados obtidos por Bastos *et al.* (2009) e Magalhães (2012) para as culturas de cana-de-açúcar e feijão.

A avaliação da exposição associada à ingestão acidental de partículas de solo durante o cultivo agrícola com o uso dos bioossólidos avaliados, calculada a partir das Equações 1 e 2, são expressas nas Tabelas 5 e 6, considerando a aplicação dos bioossólidos (cenário 1) e manejo do sistema solo-planta (cenário 2).

Tabela 5: Avaliação da exposição para os trabalhadores rurais durante o cenário 1.

Cenário	Biossólido	C _{ASC.bioss} ^(a)	M _{bioss} ^(b)	d _i ^(c)
Aplicação do biossólido	ETE Gama	7,43	0,055	4,08x10 ⁻¹
	ETE Brasília Norte	1,07		5,89 x10 ⁻²

Fonte: Autor (2023). Notas: (a) Ovos viáveis de *Ascaris* por grama de matéria seca; (b) grama de sólidos totais; (c) dose ingerida (ovos viáveis de *Ascaris*).

Tabela 6: Avaliação da exposição para os trabalhadores rurais durante o cenário 2.

Cenário	Biossólido	C _{ASC.bioss} ^(a)	F _{dil.bioss} ^(b)	D _{ASC.solo}	M _{solo} ^(c)	d _i ^(d)
Manejo (Cana-de-açúcar)	ETE Gama	7,43	0,0028	1	0,055	1,14 x10 ⁻³
	ETE Brasília Norte	1,07				1,65 x10 ⁻⁴
Manejo (Feijão)	ETE Gama	7,43	0,0028	1	0,055	1,14 x10 ⁻³
	ETE Brasília Norte	1,07				1,65 x10 ⁻⁴

Fonte: Autor (2023). Notas: (a) Ovos viáveis de *Ascaris* por grama de matéria seca; (b) grama de sólidos totais de biossólidos por gramas de sólidos totais de solo; (c) grama de sólidos totais; (d) dose ingerida (ovos viáveis de *Ascaris*).

As concentrações de patógenos ingeridas de forma involuntária pelos trabalhadores são bastante voláteis e dependem de variáveis complexas. No que se refere as doses ingeridas calculadas de ovos viáveis de *Ascaris* (d_i), fica claro, por meio das Tabelas 5 e 6, a relevância da concentração de microrganismos nos biossólidos (C_{ASC.bioss}) e a ingestão involuntária de patógenos nos resultados encontrados (M_{solo} e M_{bioss}).

A ingestão acidental de biossólidos é uma importante variável na determinação das estimativas de risco aos trabalhadores, entretanto, cercada de incertezas, o que resulta na adoção de hipóteses simplificadas e valores arbitrários (MAGALHÃES, 2012). Mara e Sleigh (2010b) destacam que essa ingestão pode ser substancialmente reduzida com treinamento dos trabalhadores (educação sanitária) e fornecimento de luvas e instalações de lavagem das mãos no local.

5.2.3 AVALIAÇÃO DA DOSE-RESPOSTA

A probabilidade de infecção para uma única exposição foi estabelecida a partir da Equação 5, considerando os dois cenários abordados neste estudo e o modelo Beta-Poisson, oriundo da interação agente-hospedeiro proposto por Navarro *et al.* (2009).

Nas Tabelas 7 e 8 estão apresentadas as probabilidades de infecção para uma única exposição à dose de *Ascaris* em relação ao cultivo e manejo das culturas, respectivamente.

Tabela 7: Avaliação da dose-resposta para os trabalhadores rurais no cenário 1.

Cenário	Biossólido	α	β	d_i	$P_i^{(a)}$
Aplicação do biossólido	ETE Gama	0,104	1,096	$4,08 \times 10^{-1}$	$3,24 \times 10^{-2}$
	ETE Brasília Norte			$5,89 \times 10^{-2}$	$5,43 \times 10^{-3}$

Fonte: Autor (2023). Nota: (a) risco de infecção para uma exposição

Tabela 8: Avaliação da dose-resposta para os trabalhadores rurais no cenário 2.

Cenário	Biossólido	α	β	d_i	$P_i^{(a)}$
Manejo (Cana-de-açúcar)	ETE Gama	0,104	1,096	$1,14 \times 10^{-3}$	$1,08 \times 10^{-4}$
	ETE Brasília Norte			$1,65 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-5}$
Manejo (Feijão)	ETE Gama	0,104	1,096	$1,14 \times 10^{-3}$	$1,08 \times 10^{-4}$
	ETE Brasília Norte			$1,65 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-5}$

Fonte: Autor (2023). Nota: (a) risco de infecção para uma exposição

A probabilidade da exposição a determinado patógeno via consumo de alimento ou partículas de solo resultar em infecção ou doença em qualquer indivíduo dentro de uma população é muito variável e depende de interações complexas entre a gente e hospedeiro (MAGALHÃES, 2012). Infeciosidade, patogenicidade e viabilidade são algumas das características inerentes ao agente patogênico e importantes nessa interação, enquanto imunidade, estado nutricional e condições socioeconômicas são algumas das características inerentes ao hospedeiro (HAAS et al., 1999; MAGALHÃES, 2012).

Os resultados indicaram que os riscos associados à aplicação dos biossólidos para uma única exposição variaram de $3,24 \times 10^{-2}$ a $5,43 \times 10^{-3}$ (por pessoa por semana), quanto ao manejo das culturas, a variação foi de $1,08 \times 10^{-4}$ a $1,56 \times 10^{-5}$ (por pessoa por semana). No entanto, em relação ao manejo do sistema solo-planta, não houve variação da probabilidade calculada a respeito dos dois tipos de culturas consideradas neste trabalho. Tal resultado se deve ao fato de que tanto o fator de diluição dos biossólidos no solo ($F_{dil.bioss}$), quanto a ingestão involuntária de partículas de biossólidos durante o cultivo (M_{solo}) utilizadas no modelo são, respectivamente, iguais para as culturas de cana-de-açúcar e de feijão.

5.2.4 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO ANUAL DE INFECÇÃO

Os riscos para múltiplas exposições durante um período de até um ano relacionados ao cultivo e manejo das culturas foram calculados a partir da Equação 6 e estão apresentados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9: Caracterização do risco anual (P_n) para o cenário 1.

Cenário	Biossólido	n ^(a)	P _i	P _n ^(b)
Aplicação do biossólido	ETE Gama	75	$3,24 \times 10^{-2}$	$9,15 \times 10^{-1}$
	ETE Brasília Norte		$5,43 \times 10^{-3}$	$3,35 \times 10^{-1}$

Fonte: Autor (2023). Notas (a) Frequência- dias por ano. (b) risco de infecção anual (pppa)

Tabela 10: Caracterização do risco anual (P_n) para o cenário 2.

Cenário	Biossólido	n ^(a)	P _i	P _n ^(b)
Manejo (Cana-de-açúcar)	ETE Gama	75	$1,08 \times 10^{-4}$	$8,10 \times 10^{-3}$
	ETE Brasília Norte		$1,56 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-3}$
Manejo (Feijão)	ETE Gama	75	$1,08 \times 10^{-4}$	$8,10 \times 10^{-3}$
	ETE Brasília Norte		$1,56 \times 10^{-5}$	$1,17 \times 10^{-3}$

Fonte: Autor (2023). Notas (a) Frequência- dias por ano. (b) risco de infecção anual (pppa)

Sobre os resultados referentes à aplicação dos biossólidos (Tabela 9), é possível concluir, de acordo com os modelos de exposição considerados, que o uso dos biossólidos levariam a valores de riscos anuais superiores ao valor de referência tolerável de $1,2 \times 10^{-4}$ pppa pela OMS para os dois biossólidos avaliados.

A respeito do risco anual calculado associado ao manejo das culturas (Tabela 10), o modelo resultou em estimativas de riscos menores em comparação ao primeiro cenário, porém, ainda superior aos limites toleráveis admitidos pela OMS para utilização de biossólidos com fins agrícolas. Esses resultados podem ser, em parte, resultado da longa sobrevivência desses organismos no solo, e, portanto, não consideração do seu decaimento ao longo do ciclo das culturas, conforme sugerido por Bastos *et al.* (2009) e Magalhães (2012).

Ferreira *et al.* (2022) avaliaram os riscos microbiológicos para os trabalhadores rurais de pequenas propriedades, envolvidos em atividades de cultivo e manejo de culturas de alface e cenoura, utilizando a AQRM e considerando *Ascaris lumbricoides* como microrganismo alvo. Os resultados obtidos na pesquisa indicaram que o risco anual de infecção durante a aplicação dos biossólidos variou de $4,44 \times 10^{-1}$ a $9,66 \times 10^{-1}$ pppa (por pessoa por ano) e o risco anual referente ao manejo das culturas variou de $6,70 \times 10^{-3}$ a $4,55 \times 10^{-2}$ pppa (alface) e $5,43 \times 10^{-3}$ a $3,70 \times 10^{-2}$ pppa (cenoura). Cabe salientar que foi considerada uma aplicação manual dos biossólidos e sem o uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI).

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por Ferreira *et al.* (2022), é possível concluir que os riscos referentes ao uso agrícola de biossólidos em larga escala são menores que os riscos anuais encontrados para pequenas propriedades. Isso se deve ao fato de que durante o cultivo de culturas

anuais em larga escala foi assumida uma agricultura mecanizada, em que trabalhador estaria menos exposto às ingestões involuntárias de partículas de bio sólidos, conseqüentemente menos expostos a uma possibilidade de infecção por *Ascaris*.

De forma geral, considerando os resultados obtidos, todos os riscos calculados superaram os níveis toleráveis adotados pela OMS. Por fim, cabe ressaltar que Magalhães (2012) evidenciou em sua pesquisa que as variáveis “concentrações de patógenos nos bio sólidos” e “ingestão acidental de bio sólidos” foram as que impactaram de forma mais nítida as estimativas de risco, indicando a necessidade de reduzir as incertezas propriamente ditas em torno dessas variáveis, bem como melhor caracterizar sua variabilidade.

5.3 CONCENTRAÇÃO DE HELMINTOS NOS BIO SÓLIDOS PARA ATENDER AOS NÍVEIS DE RISCOS TOLERÁVEIS (VMP)

A partir da adoção de níveis de riscos toleráveis, foram calculadas as doses de patógenos que, ao serem ingeridas, resultariam nesse nível de risco, e em seguida, foram calculadas as concentrações de *Ascaris* que resultariam em tais doses. O nível de risco tomado como tolerável foi o adotado pela OMS ($1,2 \times 10^{-4}$ pppa) e os resultados obtidos para os dois cenários de exposição são apresentados nas Tabelas 11 e 12, calculados a partir das Equações 8, 9, 10 e 11.

Tabela 11: Concentração tolerável de *Ascaris* em bio sólidos para o cenário 1.

Cenário	P_i'	d_i' (a)	$C_{ASC.bioss.}'$ (b)
Aplicação do bio sólido	$1,60 \times 10^{-6}$	$1,69 \times 10^{-5}$	$3,07 \times 10^{-4}$

Fonte: Autor (2023). Notas (a) dose ingerida (ovos viáveis de *Ascaris*); (b) ovos viáveis de *Ascaris* por grama de sólidos totais de bio sólidos.

Tabela 12: Concentração tolerável de *Ascaris* em bio sólidos para o cenário 2.

Cenário	P_i'	d_i' (a)	$C_{ASC.bioss.}'$ (b)
Manejo (Cana-de-açúcar)	$1,60 \times 10^{-6}$	$1,69 \times 10^{-5}$	0,11
Manejo (Feijão)	$1,60 \times 10^{-6}$	$1,69 \times 10^{-5}$	0,11

Fonte: Autor (2023). Notas (a) dose ingerida (ovos viáveis de *Ascaris*); (b) ovos viáveis de *Ascaris* por grama de sólidos totais de bio sólidos.

A partir dos resultados das concentrações toleráveis de *Ascaris* foram calculadas as concentrações toleráveis de helmintos em bio sólidos para a aplicação e manejo nas culturas consideradas.

Tabela 13: Concentrações toleráveis de helmintos em bioossólidos para o risco anual tolerável de $1,2 \times 10^{-4}$ pppa.

Cenário	C _{ASC.bioss.} ^(a)	C _{helmintos.bioss.} ^(b)
Aplicação do bioossólido	$3,07 \times 10^{-4}$	$3,41 \times 10^{-4}$
Manejo (Cana-de-açúcar)	0,11	0,12
Manejo (Feijão)	0,11	0,12

Fonte: Autor (2023). Notas (a) ovos viáveis de *Ascaris* por grama de sólidos totais de bioossólidos; (b) ovos viáveis de helmintos por grama de sólidos totais de bioossólidos.

No que se refere à aplicação dos bioossólidos (cenário 1), conforme evidenciado nas Tabelas 11 e 13, nota-se que as concentrações estimadas de patógenos nos bioossólido para que fossem observados os níveis de riscos toleráveis são extremamente baixas, ficando muito abaixo das concentrações usualmente encontradas em lodos de esgoto. Dessa forma, de acordo com os modelos utilizados, esse tipo de atividade exigiria praticamente bioossólidos livres de patógenos para que os riscos permanecessem dentro da faixa que a OMS considera tolerável.

Para o manejo do sistema solo-planta (cenário 2), os valores estimados de concentração de patógenos nos bioossólidos foram consideravelmente mais próximos aos encontrados em lodos de esgoto após devido tratamento, mas ainda assim muito abaixo do esperado em bioossólidos.

5.4 DISCUSSÃO SOBRE OS VALORES ADOTADOS POR LEGISLAÇÕES

De acordo com o que foi abordado na revisão de literatura, para avaliar o cenário nacional foi considerada a resolução CONAMA nº 498/2020 que define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bioossólidos em solos, revogando e substituindo a resolução CONAMA nº 375/2006. Em relação ao cenário internacional, foram abordadas a Norma “503” dos EUA (U.S. EPA, 1993) e as diretrizes da OMS (WHO, 2006).

Os bioossólidos gerados nas duas estações de tratamento consideradas neste trabalho não podem ser classificados como Classe A, visto que a Resolução CONAMA nº 498/2020 estabelece que as concentrações de ovos viáveis de helmintos devem ser inferiores a 1 ovo viável de helminto por grama de sólido total (<1 ovo / g ST), para os bioossólidos Classe A e não especifica um valor para os bioossólidos Classe B.

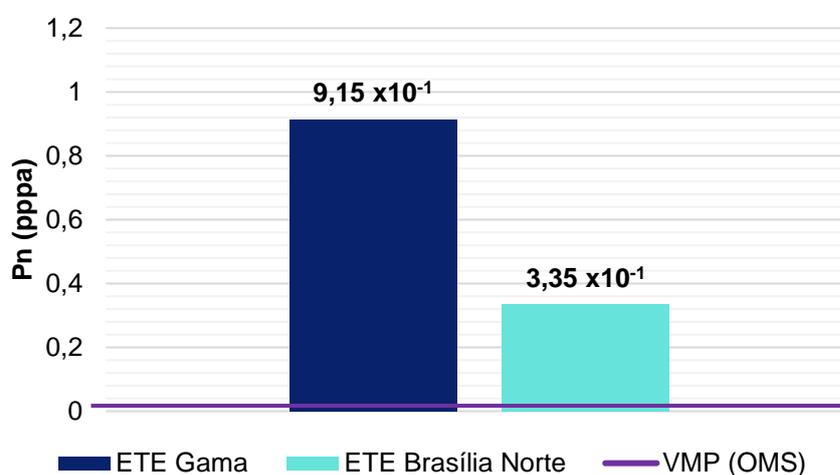
Com os resultados obtidos no item 5.3, referentes a caracterização das concentrações de microrganismos nos bioossólidos que gerariam níveis de riscos toleráveis de infecção, apresentados na Tabela 13, observa-se que os valores

obtidos se encontram abaixo dos valores indicados como parâmetros para utilização de biossólidos Classe A da resolução CONAMA 498/2020 e da Norma 503 dos EUA, além das diretrizes da OMS.

Mara e Sleight (2010a) consideram que, dependendo do contexto, a referência a um nível de proteção menos rigoroso do que 10^{-6} DALY pppa (OMS), como 10^{-5} DALY, por exemplo, resultaria em risco anual de infecção por *Ascaris* de $1,2 \times 10^{-3}$ pppa. Sendo assim, seria possível definir um limite para uso de biossólidos Classe A mais flexível, tornando mais atrativo sua aplicação em solos.

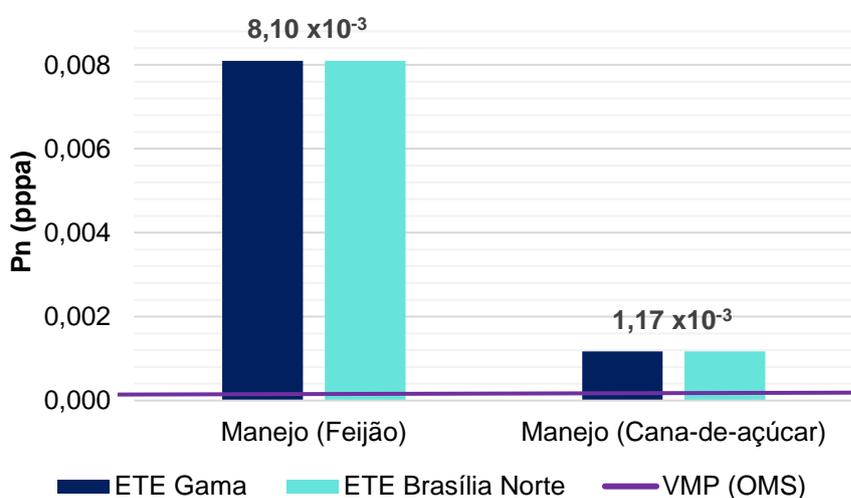
As Figuras 4 e 5 ilustram os resultados obtidos dos riscos de infecção anual relativos aos dois cenários avaliados neste trabalho, respectivamente.

Figura 4: Gráfico comparativo de caracterização do risco anual (P_n) para o cenário 1.



Fonte: Autor (2023).

Figura 5: Gráfico comparativo de caracterização do risco anual (P_n) para o cenário 2.



Fonte: Autor (2023).

6 CONCLUSÕES

A Avaliação Quantitativa de Risco Microbiológico (AQRM) se mostrou uma ferramenta válida e útil para estimativa do risco anual de infecção por *Ascaris* quanto ao uso agrícola de bioossólidos, partindo de dados de concentração do microrganismo alvo no lodo.

As variáveis analisadas na determinação das doses infectantes, em especial o número de dias de exposição ao longo de um ano e a quantidade de microrganismos ingeridos involuntariamente, mostraram-se como importantes fatores na definição da concentração de helmintos nos bioossólidos para atender aos riscos toleráveis. Vale salientar que os resultados obtidos das concentrações de helmintos ditas toleráveis segundo os valores OMS, se deram a partir de resultados específicos e não devem ser generalizados.

Após a aplicação da AQRM, os resultados indicaram que o risco anual de infecção por *Ascaris* para os trabalhadores rurais durante a aplicação dos bioossólidos variou de $3,35 \times 10^{-1}$ a $9,15 \times 10^{-1}$ pppa e o risco anual referente ao manejo das culturas variou de $1,10 \times 10^{-3}$ pppa a $8,10 \times 10^{-3}$ pppa para as culturas de cana-de-açúcar e de feijão avaliadas no estudo, respectivamente.

De acordo com os cenários avaliados, os resultados sugerem que a aplicação dos bioossólidos associado ao reúso agrícola é motivo de preocupação. Entretanto, os elevados níveis de risco podem ser atenuados com medidas de proteção ao trabalhador, como uso de EPIs, treinamento dos trabalhadores dentre outras. Assim como, os níveis de concentrações de patógenos no lodo podem ser minorados em função do uso de técnicas de higienização, combinando mecanismos térmicos, químicos e biológicos para minimizar o grau de patogenicidade do lodo.

Conforme os modelos propostos e os resultados obtidos, as características microbiológicas dos bioossólidos produzidos pela ETEs em estudo inviabilizam seu uso como fertilizantes agrícolas para as culturas propostas, em todos os cenários avaliados, pois ficam evidentes que os riscos de infecção anual por *Ascaris* ultrapassam os valores toleráveis pela OMS ($1,2 \times 10^{-4}$ pppa).

Por fim, sugere-se que estudos sejam realizados sobre produção e caracterização microbiológica de bioossólidos nas cidades alagoanas, de forma a verificar seu potencial de reúso agrícola e evitar seu destino aos aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004. 71p.
- AMOA, I. D.; REDDY, P.; SEIDU, R.; STENSTRÖM, T. A. Concentration of soiltransmitted helminth eggs in sludge from South Africa and Senegal: A probabilistic estimation of infection risks associated with agricultural application. **Journal of Environmental Management**. v. 206 p.1020-1027, 2018.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, v. 6, 2001.484 p.
- BARROS, K. B.; CHERNICHARO, C. A. L.; ANDREOLI, C. V.; SILVA, L. A. C.; BITTENCOURT, S.; KATO, M. T. Parte A: higienização e uso de lodo de esgoto no solo nota técnica 1 - tópicos de interesse. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 5-16, 2021.
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; MARA, D. D. Análise crítico-comparativa das regulamentações brasileira, estadunidense e britânica de qualidade microbiológica de bio sólidos para uso agrícola. **Revista DAE**, v. 191, n. 1, p. 10-20, 2013
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; DIAS, G. M. F.; BARONY, F. J. A. Análise crítica da legislação brasileira para uso agrícola de lodos de esgotos na perspectiva da avaliação quantitativa de risco microbiológico. **Revista AIDIS**, v. 2, n. 1, p. 143-59, 2009.
- BATISTA, L. F.; SOUZA, M. A. A. Aptidão dos lodos gerados nas Estações de Tratamento de Esgotos no Distrito Federal para condicionamento, utilização e disposição final. **Revista DAE**. v. 68, n 226, p.179-95. 2020.
- BITTENCOURT, S. Agricultural Use of Sewage Sludge in Paraná State, Brazil: A Decade of National Regulation. **Recycling**, v. 3, n. 4: 53, 2018.
- BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; OLIVEIRA, F. C.; SILVA, L. A. C.; MIKI, M. K.; BICO, A. K. Parte A: higienização e uso de lodo de esgoto no solo nota técnica 6 - uso agrícola de bio sólido. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 75-87, 2021a.
- BITTENCOURT, S.; MATOS, A. T.; SILVA, B. S.; MIKI, M. K.; BASTOS, R. K. X. Parte A: higienização e uso de lodo de esgoto no solo nota técnica 2: aspectos legais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 17-29, 2021b.
- BLUMENTHAL, U. J.; MARA, D. D.; PEASEY, A.; RUIZ-PALACIOS, G.; STOTT, R. Guidelines for the microbiological quality of treated wastewater used in agriculture: recommendations for revising WHO guidelines. **Bulletin of the World Health Organization**, v. 78, p. 1104-1116, 2000.

BRASIL. **Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 16 abr. 2023.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de biossólido em solos, e dá outras providências. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 20 de ago. 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 375 de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 30 de ago. 2006.

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. Introdução. In: Cassini, S. T. (coord.). Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. Projeto PROSAB. Rio de Janeiro, ABES, **RiMA**, 2003. p. 1-9.

CHAN, M. S. The global burden of intestinal nematode infections—fifty years on. **Parasitology Today**, v. 13, n. 11, p. 438–443. 1997.

DIAS, E. H. O. **Tratamento de lodo de esgoto por secagem em estufa: higienização e produção de biossólidos para uso agrícola**, 2012. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2012.

EISENBERG, J. N. S.; MOORE, K.; SOLLER, J. A.; EISENBERG, D.; COLFORD Jr., J. M. Microbial risk assessment framework for exposure to amended sludge projects. **Environmental Health Perspectives**, v.116, n.6, p.727-33, 2008.

FERREIRA, I. V. L.; SANTOS, P. H. A. L.; BARROS, E. S.; VICH, D. V. Uso agrícola de biossólidos: Avaliação Quantitativa de Riscos Microbiológicos para trabalhadores rurais. In: XX SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2022, Aveiro - Portugal, 2022. **Anais**. Disponível em < https://www.aprh.pt/20silubesa/docs/XX-SILUBESA_livro-resumos.pdf > Acesso em 27.08.2022.

GERARDI, M. H.; ZIMMERMAN, M. C. Wastewater pathogens. **John Wiley & Sons**, p. 179. 2004.

HAAS, C. N.; ROSE, J.; GERBA, C. P. Quantitative microbial risk assessment. **New York: John Wiley & Sons**, p. 449. 1999.

HAYS, B. D. Potential for parasitic disease transmission with land application of sewage plant effluents and sludge. **Water Research**, Onon, v. 11, p. 583-595, 1977.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção agrícola municipal**. 2023. Disponível em <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/5457>. Acesso em: 29 jan. 2023.

IGNOTO, R. F. **Avaliação quantitativa do risco microbiológico em águas e biossólidos**: estado da arte, 2010. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública). Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2010.

JIMENEZ, B; AUSTIN, A; CLOETE, E; PHASHA, C. Using Ecosan sludge for crop production. **Water Science & Technology**, v.54, n.5, 169–177p. IWA Publishing. 2006.

KACPRZAK, M.; NECZAJ, E.; FIJAŁKOWSKI, K.; GROBELAK, A.; GROSSER, A.; WORWAG, M.; RORAT, A.; BRATTEBO, H.; ALMÅS, Å.; SINGH, B. R. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. **Environmental Research**, v. 156, p. 39-46, 2017.

KIRCHMANN, H.; BÖRJESSON, G.; KÄTTERER, T.; COHEN, Y. From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. **Ambio**, v. 46, p. 143-154, 2017.

MAGALHÃES, T. B. **Uso agrícola de biossólidos**: análise crítica da resolução CONAMA 375/2006 na perspectiva da metodologia de avaliação quantitativa de risco microbiológico, 2012. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MARA, D. D.; SLEIGH, A. Estimation of *Ascaris* infection risks in children under 15 from the consumption of wastewater-irrigated carrots. **Journal of Water and Health**, v. 8, n. 1, p. 35-39, 2010a.

MARA, D. D.; SLEIGH, A. Estimation of norovirus and *Ascaris* infection risks to urban farmers in developing countries using wastewater for crop irrigation. **Journal of Water and Health**, v. 8, n. 3, p. 572-576, 2010b.

MELO, J. H. S. **Avaliação de riscos de infecção associados a helmintos em função do consumo de hortaliças cultivadas em solo com aplicação de biossólidos**, 2021. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Water reuse**: issues, technologies, and applications / written by Takashi Asano, Franklin L. Burton, Harold L. Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi, George Tchobanoglous. 1st ed. 1461p. 2007.

MOREIRA, S. F.; SANTOS, S. D. O.; SARDINHA, A. S.; PEREIRA JÚNIOR, A. O lodo de ETE como alternativa para a recuperação do solo em áreas degradadas. **Brazilian Applied Science Review**, v. 3, n. 3, p. 1564-1585, 2019.

NAVARRO, I., TEUNIS, P., MOE, C., JIMÉNEZ, B. Approaches to evaluate and develop health risk-based standards using available data. Cap. 4. In: **Risks and Risk Assessment**. p. 63- 88, 2010.

NAVARRO, I.; JIMÉNEZ, B.; CIFUENTES, E.; LUCARIO, S. Application of helminth ova infection dose curve to estimate the risks associated with biosolid application on soil. **Journal of Water and Health**, v. 7, n. 1, p. 31-44, 2009.

NEBRA - North East Biosolids And Residuals Association. A National Biosolids. Regulation, Quality, End Use and Disposal Survey, Final Report, **North East Biosolids and Residuals Association**. Tamworth: NEBRA. 2007.

SANTOS, H. F. Normatização para o uso agrícola dos biossólido no exterior e no Brasil, Capítulo 10. In: Andreoli, C. V.; von Sperling, M.; Fernandes, F. (Org.). **Lodo de esgoto: tratamento e disposição final**. 2ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. 484 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuais, v. 6).

SILVA, A. L.; LOURENÇO, C. DE L.; VILLAS BOAS, R. L.; TÁPIA, M.; MATEUS, C. de M. D. Nova tecnologia com função mista para secagem e compostagem de lodo de tratamento de esgoto e atendimento aos parâmetros legais de disposição agrícola. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2017, São Paulo, Brasil. **Proceedings**. São Paulo, Brasil: ABES, 2017.

U.S. EPA - United States Environmental Protection Agency. The standards for the use or disposal of sewage sludge. Washington, DC: **Federal Register**, Code of Federal Regulations [CFR], Title 40, Part 503. 1993.

WHO - World Health Organization. **Health Guidelines for the Use of Wastewater in Agriculture and Aquaculture (Technical Report Series No. 778)**. World Health Organization (Organização Mundial da Saúde), Geneva. 1989.

WHO - World Health Organization. Quantitative Microbial Risk Assessment: Application for Water Safety Management. **World Health Organization**, Geneva, 2016. 204p.

WHO - World Health Organization. Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater (Vol. 4). Wastewater use in agriculture. **World Health Organization** (Organização Mundial da Saúde), Geneva. 2006.