

**COMPOSTAGEM DE LODO DE ETE E SUA UTILIZAÇÃO NA
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE FERTILIZANTES MINERAIS NO
CULTIVO DO MILHO**

JÉSSICA DIAS RODRIGUES

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
OUTUBRO - 2023**

COMPOSTAGEM DE LODO DE ETE E SUA UTILIZAÇÃO NA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE FERTILIZANTES MINERAIS NO CULTIVO DO MILHO

JÉSSICA DIAS RODRIGUES

“Dissertação apresentada ao Centro de Biociências e Biotecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Biotecnologia Vegetal”.

Orientador: Gonçalo Apolinário de Souza Filho

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ
OUTUBRO - 2023

FICHA CATALOGRÁFICA
UENF - Bibliotecas
Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

R696

Rodrigues, Jéssica Dias.

COMPOSTAGEM DE LODO DE ETE E SUA UTILIZAÇÃO NA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE
FERTILIZANTES MINERAIS NO CULTIVO DO MILHO / Jéssica Dias Rodrigues. - Campos dosGoytacazes,
RJ, 2023.

82 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Vegetal) - Universidade Estadual do Norte Fluminense
Darcy Ribeiro, Centro de Biociências e Biotecnologia, 2023.

CDD - 660.6

**COMPOSTAGEM DE LODO DE ETE E SUA UTILIZAÇÃO NA
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE FERTILIZANTES MINERAIS NO CULTIVO DO
MILHO**

JÉSSICA DIAS RODRIGUES

"Dissertação apresentada ao Centro de Biociências e Biotecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Biotecnologia Vegetal".

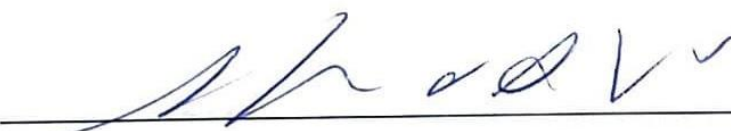
Comissão Examinadora:

Aprovada em: 26/10/2023


Dra. Aline Chaves Intorne (UENF)


Dr. Antônio Teixeira do Amaral Júnior (UENF)


Dr. Alessandro Coutinho Ramos (UVV)


Dr. Gonçalo Apolinário de Souza Filho (Orientador UENF)

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu pai Valneidy de Souza Rodrigues e minha mãe Lúcia Helena Nunes Dias Rodrigues, que colocaram como prioridade a minha educação. Pais presentes e amorosos que sempre vibraram pelos meus sonhos, conquistas e realizações.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual do Norte Fluminense por me proporcionar um mestrado de qualidade e desenvolvimento pessoal e profissional.

Ao programa de Pós-graduação em Biotecnologia Vegetal e todo corpo docente pelo conhecimento compartilhado.

À Concessionária Águas do Paraíba pelo investimento na pesquisa e por acreditar no resultado deste trabalho.

Aos amigos de laboratório Mestre Wálaci da Silva Santos, Mestre Júlia Rosa Moreira e Bióloga Jéssica Luizi de Souza Andrade pelo apoio no experimento e em especial ao Dr. Fabiano Silva Soares pelo suporte no desenvolvimento da minha dissertação.

Ao Professor Dr. Eliemar Campostrini e por sua equipe, Bióloga Anne Reis Santos e Mestre Laiza Zanelato Correia, e em especial ao Mestre Wallace de Paula Bernardo pela colaboração no experimento.

Ao meu orientador, Professor Dr. Gonçalo Apolinário de Souza Filho, pelo incentivo, confiança, condução e orientação para essa pesquisa. Um exemplo de ser humano, professor e profissional.

Agradeço a Deus pela vida, saúde e suporte para enfrentar os desafios da caminhada evolutiva.

Agradeço ao meu pai Valneidy de Souza Rodrigues que não está fisicamente entre nós, mas que do céu ainda cuida de mim. Sempre sonhou meus sonhos comigo, te amarei por toda a eternidade.

Agradeço à minha família, em especial à minha filha, Lara Dias Campos e ao meu esposo, Felipe da Silva Campos, que entenderam meus momentos de ausência para desenvolver este trabalho e sempre me impulsionaram. Agradeço à minha mãe, Lúcia Helena Nunes Dias, à minha sogra, Ana Lúcia Viana da Silva e à minha avó Erenita Nunes Dias pelo suporte, incentivo e por sempre estarem ao meu lado por toda a minha trajetória.

RESUMO

A utilização de fertilizantes orgânicos proveniente do lodo de esgoto na agricultura é uma alternativa sustentável para amenizar os impactos ambientais dos resíduos do saneamento básico e dos fertilizantes minerais, promovendo a economia circular. O composto orgânico de lodo de ETE é um fertilizante rico em matéria orgânica e nutrientes vegetais, contudo é necessária a complementação com fertilizantes minerais (adubação organomineral) para suportar o crescimento ideal da planta e obter uma colheita bem-sucedida. Este estudo tem como objetivo examinar a qualidade do composto orgânico produzido, através da compostagem, quanto aos aspectos microbiológicos, presença de metais e teor de nutrientes de interesse agrícola e examinar o efeito do composto orgânico na substituição parcial de fertilizantes minerais em plantas de milho por meio de avaliações morfológicas e fisiológicas após 45 dias de plantio. Os principais resultados indicaram que o processo de compostagem desenvolvido neste trabalho com duração de 180 dias, foi eficaz na inertização do lodo de ETE, gerando um produto seguro e de qualidade. O composto orgânico produzido foi classificado como Classe B de acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020, pois não ultrapassou o valor limite para o teor de metais tóxicos e dos microrganismos patogênicos. Os teores dos macronutrientes foram de 1,64% para nitrogênio, 0,53% para fósforo, 0,04% para potássio, 1,16% para cálcio, 0,24% para magnésio e 0,32% para enxofre. Medição de 6,65 para pH, 53,46% para umidade, 40,41% para matéria orgânica e 5,15 Relação C/N. Os resultados apresentados atenderam ao padrão de qualidade para fertilizante orgânico de acordo com Instrução Normativa MAPA SDA nº 23/2005. As análises dos efeitos sobre o crescimento e desenvolvimento da planta revelaram ganho de peso fresco de parte aérea e também no peso fresco e seco de raiz para as plantas que receberam valores superiores a 50% da complementação de fertilizantes minerais ao composto orgânico de ETE. A utilização do composto orgânico produzido, em formulações organominerais, se mostrou efetiva para a adubação da cultura do milho, promovendo o crescimento radicular e o incremento de biomassa de 41,68% comparado ao tratamento com adubação mineral. Os resultados revelaram a possibilidade de redução na demanda por nutrientes minerais, indicando efeito sinérgico, com potencial redução de custos de adubação.

Palavras-chave: lodo de esgoto, produção de composto orgânico, economia circular, nutrição do milho

ABSTRACT

The use of organic fertilizers derived from sewage sludge in agriculture is a sustainable alternative to mitigate the environmental impacts of basic sanitation waste and mineral fertilizers, promoting circular economy. The organic compound from sewage treatment plant sludge is a fertilizer rich in organic matter and plant nutrients; however, supplementation with mineral fertilizers (organomineral fertilization) is necessary to support optimal plant growth and achieve a successful harvest. This study aims to examine the quality of the produced organic compound, through composting, regarding microbiological aspects, presence of metals, and nutrient content of agricultural interest. It also aims to investigate the effect of the organic compound on the partial replacement of mineral fertilizers in corn plants through morphological and physiological evaluations after 45 days of planting. The main results indicated that the composting process developed in this work, lasting 180 days, was effective in inerting the sewage treatment plant sludge, generating a safe and quality product. The produced organic compound was classified as Class B according to CONAMA Resolution No. 498/2020, as it did not exceed the limit value for toxic metal content and pathogenic microorganisms. Macronutrient contents were 1.64% for nitrogen, 0.53% for phosphorus, 0.04% for potassium, 1.16% for calcium, 0.24% for magnesium, and 0.32% for sulfur. The measurements were 6.65 for pH, 53.46% for moisture, 40.41% for organic matter, and a 5.15 C/N ratio. The presented results met the quality standard for organic fertilizer according to MAPA SDA Normative Instruction No. 23/2005. Analyses of the effects on plant growth and development revealed fresh weight gain in the aerial part and also in the fresh and dry weight of the roots for plants that received more than 50% supplementation of mineral fertilizers to the sewage treatment plant organic compound. The use of the produced organic compound in organomineral formulations proved effective for corn crop fertilization, promoting root growth and a 41.68% increase in biomass compared to the mineral fertilization treatment. The results indicated the possibility of reducing the demand for mineral nutrients, suggesting a synergistic effect with the potential to reduce fertilization costs.

Keywords: sewage sludge, organic compound production, circular economy, corn nutrition

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma do tratamento de esgoto.....	5
Figura 2: Comportamento da temperatura no processo de compostagem.....	15
Figura 3: Fluxograma típico de um processo de compostagem.....	16
Figura 4: ETE Esplanada da Concessionária Águas do Paraíba.....	21
Figura 5: Planta piloto de compostagem na ETE Esplanada.....	23
Figura 6: Montagem das leiras de compostagem.....	24
Figura 7: Monitoramento das leiras de compostagem.....	24
Figura 8: Leiras de compostagem maturadas.....	25
Figura 9: Substratos utilizados no experimento (solo, lodo de esgoto compostato e fertilizantes minerais NPK)	28
Figura 10: Experimento do plantio de milho em vasos.....	29
Figura 11: Medição do diâmetro do colmo utilizando o paquímetro de uma das análises morfológicas.....	30
Figura 12: Retirada das plantas de milho do vaso.....	30
Figura 13: Medição dos índices de vegetação para as análises fisiológicas utilizando os equipamentos clorofilômetro SPAD 502 e SpectraVue CI-710s.....	31
Figura 14: Curva de temperatura das fases da compostagem do lodo de esgoto.....	33
Figura 15: Parâmetros morfológicos das plantas em resposta à aplicação dos tipos de adubos.	40
Figura 16: Parâmetros fisiológicos pela avaliação de pigmentos foliares, eficiência do uso da luz, estresse da planta pela senescência e conteúdo de água foliar da planta em resposta à aplicação dos tipos de adubos.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores máximos permitidos de microrganismos patogênicos no bio sólido a ser destinado para uso, em solos segundo o CONAMA nº 498/2020	10
Tabela 2: Valores máximos permitidos de metais no bio sólido a ser destinado para uso, em solos segundo CONAMA 498/2020	11
Tabela 3: Dados Observados e Projeções de Produção e de Consumo de Milho (Brasil 2021-2027) Fonte: Adaptado de Brasil (2021)	20
Tabela 4: Faixa ideal de nutrientes para atendimento à demanda nutricional do milho (Malavolta et al.,1997)	21
Tabela 5: Potencial agrônomo do lodo de esgoto bruto antes da higienização.	26
Tabela 6: Caracterização microbiológica e valores máximos de microrganismos patogênicos no lodo de esgoto bruto antes da higienização	26
Tabela 7: Relação C/N dos materiais utilizados na compostagem: lodo de esgoto bruto e cavaco de madeira.....	27
Tabela 8: Doses e fontes aplicados nos tratamentos	31
Tabela 9: Caracterização química do solo utilizado no experimento	33
Tabela 10. Potencial agrônomo do composto orgânico de ETE utilizado no experimento.....	41
Tabela 11: Caracterização microbiológica e valores máximos de microrganismos patogênicos no composto orgânico de ETE a ser destinado para uso, em solos de acordo com o CONAMA 498/2020.....	42
Tabela 12: Caracterização química e valores máximos permitidos de metais no composto orgânico de ETE a ser destinado para uso, em solos de acordo com o CONAMA 498/2020	43

ÍNDICE DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

°C: Celsius

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANDA: Associação Nacional para Difusão de Adubos

Ag: Prata

Al: Alumínio

As: Arsênio

ATP: Adenosina trifosfato

B: Boro

Ba: Bário

Ca: Cálcio

Cd: Cádmio

C/N: Relação Carbono e Nitrogênio

Co: Cobalto

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente

cm: centímetro

Cr: Cromo

CRA: capacidade de retenção de água

CTC: capacidade de troca de cátions

Cu: Cobre

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto

EUA: Estados Unidos da América

UENF: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

FAO: Food and Agriculture Organization

Fe: Ferro

g: Gramas

g/L: Gramas por litros

Hg: Mercúrio

K: Potássio

KCL: Cloreto de potássio

Kg: Quilograma

mg: Miligramas

Mg: Magnésio

Mo: Molibdênio

Mn: Manganês

MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

ml: Mililitros

Mn: Manganês

N: Nitrogênio

NADPH: Nofato de dinucleotídeo de nicotinamida e adenina

NH₃: Amônia

NBR: Norma Brasileira

Ni: Níquel

ODS: Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU: Organização das Nações Unidas

P: Fósforo

P₂O₅: Superfosfato simples

Pb: Chumbo

PNRS: Política Nacional de Resíduos Sólidos

pH: Potencial Hidrogeniônico

RJ: Rio de Janeiro

S: Enxofre

SP: São Paulo

SPAD: Soil Plant Analysis Development

SNIS: Sistema de Informações sobre Saneamento

Zn: Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Tratamento de esgoto e características do lodo de esgoto.....	5
2.2	Legislação e aplicação de biossólidos na agricultura.....	8
2.3	Compostagem de lodo de esgoto sanitário	14
2.4	Cultura do milho e adubação organomineral	18
3	OBJETIVOS.....	23
3.1	Objetivo Geral	23
3.2	Objetivos Específicos	23
4	METODOLOGIA	24
4.1	Compostagem.....	24
4.1.1	Caracterização dos materiais utilizados na compostagem	25
4.1.2	Processo de compostagem do lodo de ETE	27
4.1.3	Caracterização do composto orgânico.....	29
4.1.4	Efeito do composto orgânico com diferentes proporções de fertilizantes minerais na cultura do milho	30
4.2	Localização da área experimental	30
4.2.1	Delineamento experimental e tratamentos	30
4.2.2	Substratos utilizados no cultivo de milho	31
4.2.3	Cultivo das plantas.....	34
4.2.4	Avaliações morfológicas e fisiológicas das plantas	34
4.3	Análises morfológicas	34
4.3.1	Análises fisiológicas.....	36
4.3.2	Análise dos dados.....	36
4.3.3	RESULTADOS	38
5	Compostagem de lodo de esgoto	38
5.1	Produção do composto orgânico de ETE	38
5.1.1	Qualidade nutricional do composto orgânico de ETE	40
5.1.2	Qualidade microbiológica do composto orgânico de ETE.....	41
5.1.3	Teores de metais do composto orgânico de ETE	42
5.1.4	Efeito do composto orgânico com diferentes proporções de fertilizantes minerais no desenvolvimento de plantas de milho.....	43
5.2	Efeito do composto orgânico com diferentes proporções de fertilizantes minerais na fisiologia vegetal de plantas de milho	48
5.3	DISCUSSÃO	51
6	CONCLUSÕES	64
7	PERSPECTIVAS.....	65
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
9		

1 INTRODUÇÃO

Anualmente milhões de pessoas morrem de doenças associadas ao abastecimento de água e a infraestrutura no esgotamento sanitário a nível mundial (Spinosa; Doshi, 2021). Uma gestão segura do esgoto sanitário é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico sustentável e a saúde das comunidades conforme preza os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) pela meta 6.2 da Agenda 2030: “alcançar o acesso a saneamento e higiene adequados e equitativos para todos, e acabar com a defecção a céu aberto, com especial atenção para as necessidades das mulheres e meninas e daqueles em situação de vulnerabilidade (ONU, 2015).

A desejada expansão das redes de esgotamento sanitário, e seu tratamento em estações de tratamento de esgoto (ETE), geram grande quantidade de um importante resíduo: O lodo de esgoto. Tal resíduo quando higienizado apropriadamente pode ser utilizado como fonte de nutrientes e matéria orgânica para solos agrícolas e plantas (Tontti *et al.*, 2017). Nessa visão, sua aplicação na agricultura atende ao segundo objetivo de desenvolvimento sustentável (ODS) pela meta 2 da Agenda 2030: “acabar com a fome; alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável” (ONU, 2015). Porém no Brasil apenas 10% da produção de lodo de esgoto é utilizada para fins agrícolas e o restante é destinado a aterros sanitários (Borba *et al.*, 2018).

No Brasil não está completamente difundida a prática de aplicar lodo de esgoto higienizado nos solos (Silveira; Matos 2021). A legislação brasileira que ampara o aproveitamento do lodo de esgoto em solos é a resolução Conama nº 498 que define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto e seus produtos derivados. Portanto, o uso do lodo de esgoto em solos se enquadra nos princípios de reciclagem de resíduos em consonância com a Lei nº 12.305 de 2010 que define a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010).

Um dos fatores que limitam o uso de lodo de esgoto na agricultura é o risco de contaminação do solo e dos alimentos por microrganismos patogênicos causadores de doenças e metais (Abreu-Junior *et al.*, 2019). Alguns metais são

nutrientes essenciais requeridos em pequenos teores pelas plantas, porém em altas concentrações, esses elementos podem afetar negativamente os parâmetros morfológicos e fisiológicos da planta, reduzindo o desenvolvimento vegetal, causando impactos ambientais no solo e riscos à saúde humana (Bączek-Kwinta, *et al.*, 2019). As características do lodo de esgoto dependem da origem do esgoto sanitário e o tipo de processo da estação de tratamento de esgoto (Kim *et al.*, 2017).

A compostagem do lodo de esgoto proporciona estabilização, redução ou até eliminação de microrganismos patogênicos, e permite a recuperação de nutrientes e matéria orgânica (Kulikowska, 2016). Além disso, o processo de compostagem reduz a disponibilidade de metais e cátions para as plantas por meio da mineralização dos compostos orgânicos (Vaca *et al.*, 2011). A compostagem é um processo biológico que transforma resíduos orgânicos, como o lodo de ETE, em fertilizantes orgânicos aplicáveis na agricultura (Budziak *et al.*, 2004).

O uso de fertilizantes minerais na agricultura promove rápido efeito no crescimento das plantas e aumento da produtividade (Chandini *et al.*, 2019). O uso excessivo de fertilizantes minerais pode promover impactos ambientais incluindo a eutrofização das águas devido ao excesso de nitrogênio e diminuição da biodiversidade (Chagnon *et al.*, 2014). Segundo dados da Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA, 2021) houve um aumento nas importações de fertilizantes minerais no Brasil de 7,4 milhões de toneladas em 1998 para 33 milhões em 2020, um crescimento de 445% em duas décadas. Dentre os três principais nutrientes aplicados por meio dos fertilizantes minerais no Brasil, o potássio é o mais utilizado com 38%, seguido por fósforo, com 33%, e nitrogênio, com 29%. Em 2020, soja, milho e cana-de-açúcar responderam por 72% do consumo de fertilizantes minerais no Brasil (Globalfert, 2021).

A população mundial alcançou o marco de 8 bilhões de pessoas em 15 de novembro de 2022 (Ritchie, 2023). A população mundial está crescendo em 80 milhões de pessoas por ano (World-O-Meter, 2023). Um relatório da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação aborda a necessidade de aumento da produção de alimentos com redução do grave desperdício, redução na proporção de terra arável adequada devido aos efeitos

antrópicos como o aquecimento global e a possibilidade de escassez de matérias-primas relacionada a produção de fertilizantes minerais (FAO, 2020).

O atual desafio da sociedade é aumentar a produção agrícola por meio de tecnologias capazes de substituir ou diminuir o uso de fertilizantes minerais (busca de recursos alternativos de nitrogênio, fósforo e potássio) e seus impactos ambientais negativos (Foley *et al.*, 2011). Os fertilizantes orgânicos são considerados uma alternativa sustentável e econômica, uma vez que eles podem aumentar a produção agrícola (Kawalekar, 2013). Fertilizantes orgânicos contém microrganismos vivos que melhoram as propriedades do solo restaurando a fertilidade (Abdel-Raouf *et al.*, 2012).

As estações de tratamento de esgoto podem ser tratadas como fontes renováveis de nitrogênio biológico, devido ao fato de o lodo de esgoto conter cerca de 6 a 8% de nitrogênio em matéria seca (Batstone *et al.*, 2015). O lodo de esgoto após receber um tratamento para ser higienizado passa a ser entendido como biossólido (Wang *et al.*, 2008). Pela composição rica em matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e em menores quantidades de potássio, o lodo de esgoto higienizado tem sido fortemente sugerido para a aplicação na agricultura como condicionador e fertilizante do solo (Usman *et al.*, 2012).

De forma geral, embora o lodo gerado pelas ETEs represente apenas de 1 a 2% do volume do esgoto tratado, o seu gerenciamento é bastante complexo e tem um custo estimado entre 20% e 60% do total gasto com a operação da ETE. Na prática, os recursos investidos em tratamento de esgotos não incluem soluções para os seus subprodutos e resíduos (Andreoli *et al.*, 2001).

Os benefícios que podem ser obtidos com a aplicação de composto orgânico de ETE são a reciclagem da matéria orgânica e o aporte de nutrientes no solo, melhorando suas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e a produtividade agrícola (Abdel-Raouf *et al.* 2012). Porém, o composto orgânico de ETE não contém as concentrações ideais de nutrientes exigidas pelas culturas e sua aplicação como fonte exclusiva de nutrientes na agricultura pode gerar deficiências nutricionais nas plantas (Souza, 2004).

A complementação com fertilizantes minerais é necessária para a garantia do aporte nutricional da lavoura, visto que os fertilizantes minerais são fornecedores de nutrientes prontamente disponíveis para as plantas. Por outro lado, a disponibilidade de nutrientes presentes no composto orgânico de ETE

depende da taxa de decomposição do resíduo e da sua interação com o solo e com a planta (Antonkiewicz *et al.*, 2019). A recuperação de nitrogênio além de outros nutrientes presentes no composto orgânico de ETE pode substituir parcialmente os fertilizantes minerais na aplicação agrícola e reduzir os custos de produção (Yagmur *et al.*, 2017).

Diversas pesquisas têm abordado os efeitos da aplicação de composto orgânico de ETE com complementação mineral no crescimento do milho. No entanto, os parâmetros morfológicos e fisiológicos do milho adubados com este material ainda não foram completamente esclarecidos. O estudo desses parâmetros pode auxiliar na escolha das doses de composto orgânico de ETE e doses da complementação de fertilizantes minerais visando suprir as necessidades nutricionais da cultura.

Neste trabalho, foi produzido composto orgânico proveniente da compostagem do lodo de ETE com qualidade sanitária e nutricional. Foi avaliado o efeito do composto orgânico de ETE no desenvolvimento de plantas de milho por meio de ensaios em casa de vegetação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamento de esgoto e características do lodo de esgoto

O tratamento de esgoto é uma das quatro vertentes que compõe o saneamento básico essencial. As demais vertentes estão relacionadas ao tratamento de água potável, à gestão dos resíduos sólidos e à drenagem das águas pluviais (Gobbi, 2003). As estações de tratamento de esgoto prestam um serviço ambiental essencial à sociedade e à saúde pública, pois tratam diariamente milhões de litros de esgoto e lançam uma considerável redução da carga orgânica nos corpos hídricos (Pereira Neto, 2007).

Segundo o Sistema de Informações sobre Saneamento (SNIS), o panorama do saneamento básico do Brasil em 2021, com relação ao tratamento de esgoto, do volume coletado pelo sistema público existente, 79,8% recebem tratamento antes de ser lançado no corpo receptor. No entanto, do volume gerado, em relação ao volume de água consumido, apenas 50,8% recebem tratamento. Ou seja, cerca de metade do esgoto produzido no país pode estar sendo lançado na natureza sem nenhum tratamento. Os menores índices de tratamento de esgoto gerado no país são identificados nas macrorregiões Norte e Nordeste (Brasil, 2021).

No Brasil, a universalização do saneamento é necessária para assegurar mais qualidade de vida para a população e a preservação do meio ambiente, visto que apenas metade do esgoto do país é tratado (Silveira; Matos, 2021). Com o estabelecimento do Marco Legal do Saneamento Básico prevê-se que 90% da população deverá ter acesso à coleta e tratamento de esgoto até 2033 (Brasil, 2020a).

Conforme Von Sperling (2005) o tratamento de esgoto sanitário abrange processos físicos, químicos e biológicos e se divide em níveis de tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. A etapa preliminar ocorre quando o afluente chega na Estação de Tratamento de Esgoto - ETE. Neste ponto, os sólidos de maior tamanho e consistência ficam retidos no gradeamento, e a areia e os resíduos menores ficam retidos no desarenador. Em sequência, o esgoto passa pelo tratamento primário onde ocorre a remoção dos sólidos sedimentáveis pela ação da gravidade e segue pelo tratamento secundário onde

ocorre a remoção da matéria orgânica por meio da atividade biológica a qual é formada por bactérias, fungos e protozoários (Andreoli, C. V.; Teixeira Pinto, 2001). O tratamento terciário não é contemplado em todas as estações, nele ocorre a remoção de nutrientes minerais tais como nitrogênio e fósforo por meio de aplicação de produtos químicos quando o tratamento nas etapas anteriores não atingiu a qualidade desejada (Von Sperling, 2005), conforme a Figura 1.

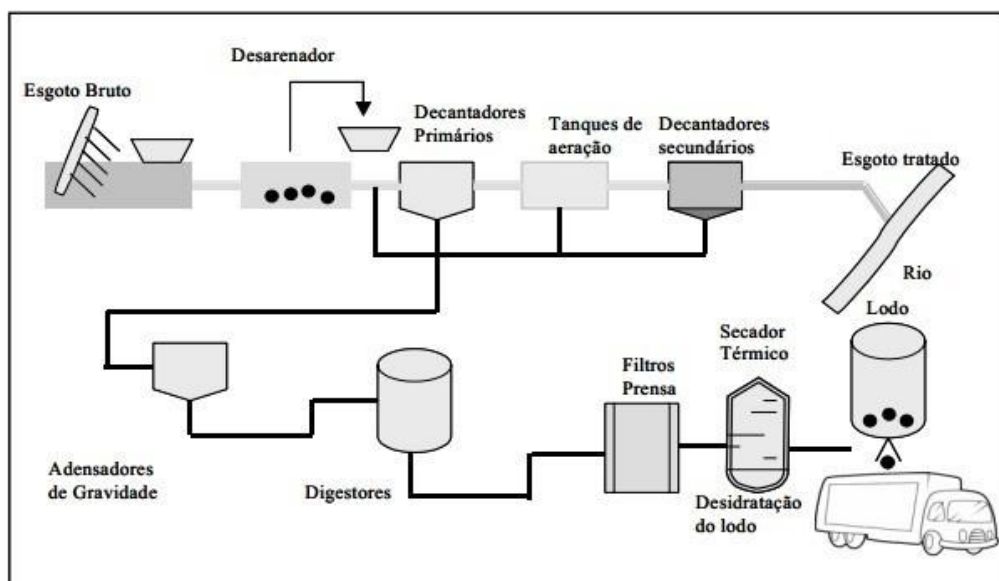


Figura 1: Etapas do funcionamento do tratamento convencional de esgoto (Oliveira, 2006)

Ao longo do processo de tratamento de esgoto, ocorre a geração de lodo, considerado um resíduo semissólido, pastoso, rico em matéria orgânica, nutrientes minerais, produtos químicos orgânicos, inorgânicos, metais, com odor, com atratividade para vetores e altas concentrações de microrganismos patogênicos (Xu, 2014).

As características do lodo de esgoto dependem da origem do esgoto e do tipo de tratamento (Kim *et al.*, 2017). Geralmente o lodo possui nutrientes de interesse agrônomo como N, P e K. Além disso possui também metais que em determinadas quantidades são essenciais aos organismos, como é o caso do Zn, Mg, Cu e Fe, chamados micronutrientes (Bettiol, W.; Camargo, 2006).

Sempre que se enaltecem as vantagens agrônomicas do aproveitamento do lodo, a questão dos metais é uma preocupação, pois os metais tais como Pb, Hg, Cd, Cr, As e Se, que são elementos químicos com

maior densidade, não desempenham funções nutricionais ou bioquímicas no metabolismo, sendo tóxicos às plantas e aos animais (Ferreira *et al.*, 1999).

Os metais ocorrem naturalmente nos solos, porém as suas concentrações são baixas, em partes por milhão, assim como a sua solubilidade. Cabe lembrar que os micronutrientes Co, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn e Ni são metais e que o limite entre a essencialidade e a toxicidade é dada pela dose de aplicação do lodo de esgoto ou concentração disponível no solo às plantas (Bettiol, W.; Camargo, 2006).

A concentração dos metais de maior densidade e tóxicos não essenciais varia amplamente com as características das canalizações da rede de coleta e bacia de esgotamento onde o lodo de esgoto é gerado, então o lodo da ETE que recebe apenas esgoto doméstico contém uma pequena quantidade desses metais (Ferreira *et al.*, 1999). Por outro lado, quando há disposição de efluentes industriais como nas grandes metrópoles, os lodos podem conter diversos metais de maior densidade em concentrações variadas de acordo com os processos produtivos (Silva *et al.*, 2001).

O esgoto sanitário confere ao lodo características não desejadas, devido às elevadas concentrações de microrganismos no lodo bruto provenientes das fezes, que são causadoras de doenças para a saúde humana (Andreoli; Teixeira Pinto, 2001). Os agentes bacterianos encontrados no lodo são: *Salmonella sp.*, *Shigella sp.*, *Escherichia coli*, *Vibrio cholerae*, *Leptosira sp.* Dentre os agentes virais podem ser citados: vírus da hepatite A, rotavírus, enterovírus e reovírus. Quanto aos protozoários, são encontrados: *Cryptosporidium*, *Entamoebahistlytica*, *Giardia lamblia*, *Balantidium coli* e *Toxoplasma gondii*. Os helmintos mais frequentes são: *Ascaris lumbricoides*, *Ascaris sum*, *Toxocara sp.*, *Trichuristrichiura*, *Taeniasolium*, *Taeniasaginata*, *Necator americanus* e *Hymenolepis nanam*, *Hymenolepis diminuta* (Soccol *et al.*, 2010).

Os ovos de helmintos, como dos gêneros *Ascaris*, *Toxocara* e *Tricuris*, são extremamente resistentes à ampla variedade de condições físicas e químicas, sendo capazes de permanecer viáveis, em condições de sombra e umidade, por dois até sete anos, no solo (Corrêa *et al.*, 2007). Dentre as bactérias entéricas patogênicas encontradas no esgoto, a *Salmonella spp.* e a *Shigella spp.* representam o maior risco de infecção para humanos, pois são mais encontradas em esgotos domésticos (Andreoli *et al.*, 2003).

Nos próximos anos o avanço da infraestrutura de coleta e tratamento de esgoto sanitário tende a elevar a produção de lodo de esgoto, tornando o gerenciamento desse resíduo um grande desafio (Wang *et al.*, 2008). Assim, torna-se necessária higienização do lodo de esgoto para eliminar as características nocivas e o uso ser seguro, visto que a aplicação sem um tratamento resulta em impactos ambientais e risco à saúde pública devido a presença de microrganismos patogênicos que são fatores limitantes para a reciclagem do lodo de esgoto (Peal *et al.*, 2014).

Milhões de toneladas de lodo de esgoto são gerados anualmente, principalmente em países industrializados ou em desenvolvimento, como Japão (70 milhões), China (30 milhões) e EUA (6 milhões) (Bouriou *et al.*, 2015; Rigby *et al.*, 2016). No Brasil, estima-se que cerca de 1,5 milhão de toneladas são produzidos por ano (Brasil, 2017), com tendência de aumento nos próximos anos devido à expansão do saneamento básico. No Estado do Rio de Janeiro, são produzidas cerca de 365 toneladas de lodo de esgoto por dia, totalizando 133.225 toneladas por ano, sendo quase a totalidade descartada em aterros sanitários (Pers, 2014).

2.2 Legislação e aplicação de biossólidos na agricultura

O subproduto das ETEs é considerado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 10.004:2004 como resíduo sólido, não sendo permitido seu lançamento em águas superficiais e solo, sem um pré-tratamento (ABNT, 2004). O efeito da disposição incorreta dos resíduos sólidos gerados pelas ETE é considerado crime ambiental pela Lei 9.605/98 (Brasil, 1998) que dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. A busca de soluções para destinação do lodo de esgoto com foco na recuperação da matéria orgânica é o caminho sustentável a ser seguido, inclusive recomendado pela Lei Federal nº 12.305 (Brasil, 2010), que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Nos últimos 20 anos, a legislação para a reciclagem agrícola do lodo de esgoto, seja como matéria-prima para fabricar fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo ou para uso direto no solo como resíduo, muito

avançou. Como matéria-prima, as regras foram atualizadas pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), por meio da Instrução Normativa SDA Nº 61 de 08/07/2020 (MAPA, 2020), e como resíduo, o seu uso direto no solo segue os critérios da resolução CONAMA Nº 498 de 19/08/2020 (Brasil, 2020), versão atualizada da Resolução CONAMA Nº 375 de 29/08/2006 (Brasil, 2006).

O lodo de esgoto se enquadra na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, que reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotados pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos. De acordo com seu artigo 7º, um dos objetivos da PNRS é a “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos”. Entre as formas possíveis de reutilizar o lodo, estão: reaproveitamento industrial; fabricação de tijolos e cerâmicas; produção de agregado leve para construção civil; produção de cimento; reaproveitamento agrícola; fertilizante orgânico e compostagem (Brasil, 2010).

A compostagem termofílica tem a sua capacidade de transformar biologicamente o resíduo lodo de esgoto em um produto completamente diferente que se torna matéria prima (Sullivan *et al.*, 2002). O composto orgânico resultante é passível de registro no MAPA como produto de uso seguro e irrestrito na agricultura, e o seu valor agronômico é dado pelo conteúdo de carbono orgânico, macro e micronutrientes, capacidade de troca de cátions (CTC), capacidade de retenção de água (CRA), substâncias húmicas e fúlvicas e grande diversidade microbiológica, representada por inúmeras espécies de bactérias e fungos (MAPA, 2005).

No Brasil, o aproveitamento do lodo de esgoto em solos encontra amparo legal na resolução nº 498 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), que define critérios e procedimentos para a produção e aplicação de bioresíduos em solos. Esta resolução, publicada no dia 19 de agosto de 2020, consiste em uma versão atualizada da resolução Conama nº 375/2006, que por sua vez foi revogada. A resolução Conama nº 498/2020 amplia as oportunidades

de uso em solos do lodo de esgoto, que após passar por processos de tratamento e beneficiamento, passa a ser denominado de bioossólido (Brasil, 2020).

O termo bioossólido foi criado em 1990 para trazer a ideia de valoração do resíduo destacando o uso benéfico de forma segura, reciclando a matéria orgânica, umidade e os nutrientes contidos no lodo de esgoto (Wang *et al.*, 2008). O controle da utilização de bioossólido e as respectivas restrições de uso é regulamentado pela Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020) e entre os requisitos de qualidade do bioossólido, são definidos limites máximos de concentração para agentes patogênicos, indicadores bacteriológicos e contaminantes inorgânicos. Tal resolução define bioossólido como um produto do tratamento do lodo de esgoto sanitário que atende aos critérios microbiológicos e químicos, estando, dessa forma, apto a ser aplicado em solos. O bioossólido será classificado em Classe A ou Classe B a depender do critério microbiológico e das substâncias químicas presentes (metais).

Segundo a Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020), para que o bioossólido seja classificado como Classe A, deverá atender ao limite máximo de 103 *Escherichia coli* por grama de sólidos totais (g-1 de ST) e para que o bioossólido seja classificado como Classe B, deverá atender ao limite máximo de 106 *Escherichia coli* por grama de sólidos totais (g-1 de ST) e ambos com resultado de <1 ovos e larvas/g e ausência para *Salmonella sp.* Sendo a Classe A, um critério mais amplo, permitido para cultivo de alimentos consumidos crus e cuja parte comestível tenha contato com o solo, além das pastagens e forrageiras. A Classe B tem um critério restritivo destinado ao cultivo de produtos alimentícios que não sejam consumidos crus e produtos não alimentícios, pastagens, forrageiras e árvores frutíferas (Tabela 1).

Tabela 1: Valores máximos permitidos de microrganismos patogênicos no bioossólido a ser destinado para uso, em solos segundo o CONAMA nº 498/2020

Caracterização Microbiológica	Valor Máximo permitido no bioossólido	
	Classe A	Classe B
Ovos e larvas viáveis de Helminthos (ovos e larvas/g)	<1,00	<1,00
<i>Salmonella sp.</i> (NMP/10g)	Ausência	Ausência
<i>Escherichia coli</i> (NMP/g ST)	1000	1000000

Na Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020), os processos para obtenção de biossólido Classe A, está descrito como: Lodo tratado em um dos processos de redução adicional de patógenos. Compostagem com revolvimento das leiras: 15 dias a 55°C no mínimo, com revolvimento mecânico da leira durante pelo menos 5 dias, ao longo dos 15 dias do processamento.

Na Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020), os processos para obtenção de biossólido Classe B está descrito como: Lodo tratado em um processo de redução significativa de patógenos. Compostagem por qualquer um dos métodos citados anteriormente, desde que a biomassa atinja uma temperatura mínima de 40°C, durante pelo menos cinco dias, com a ocorrência de um pico de 55°C, ao longo de quatro horas sucessivas durante este período.

Segundo a Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020), o biossólido para uso, em solos, será classificado em Classe A ou Classe B, de acordo com os valores máximos permitidos de substâncias químicas, conforme apresentado na Tabela 2, os quais não poderão ser ultrapassados em qualquer das amostras analisadas.

Tabela 2: Valores máximos permitidos de metais no biossólido a ser destinado para uso, em solos segundo CONAMA 498/2020

Substâncias Químicas	Valor Máximo permitido no biossólido (mg/kg-1 ST)	
	Classe A	Classe B
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1500	4300
Cromo	1000	3000
Mercúrio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2800	7500

Entre os procedimentos da Resolução CONAMA nº 498/2020 (Brasil, 2020) estão aqueles relacionados ao licenciamento da Unidade de Gerenciamento de Lodo (UGL), à frequência de monitoramento do biossólido, à elaboração de projeto agrônômico e às condições de manuseio, transporte e

aplicação do material. Também estabelece critérios para culturas e áreas agrícolas aptas a receber o bio sólido, para restrições locacionais, para definição de dose de aplicação e para o monitoramento das áreas de aplicação (BRASIL, 2020).

O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, publicou, em 14 de janeiro de 2004, o decreto nº 4.954, que regulamenta a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, e dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção, bem como do comércio de fertilizantes orgânicos, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura (Brasil, 2004). Além disso, foi publicada a Instrução Normativa SDA nº 23 de 31/08/2005, onde são apresentados as classes e os padrões de qualidade específicos para os fertilizantes orgânicos, que estão diretamente vinculados a origens das matérias-primas utilizadas em sua produção (MAPA, 2005). Neste contexto, o fertilizante orgânico deve apresentar as seguintes garantias para ser comercializado: matéria orgânica total (mínimo de 40%), nitrogênio total (mínimo de 1%), pH (mínimo de 6,0), relação C/N (máximo de 18/1) e umidade (máximo de 50%) (MAPA, 2005).

Para ter critérios para classificar o que são teores de metais elevados ou não, a legislação pertinente ao MAPA, por meio da Instrução Normativa SDA nº 7 de 12/04/2016, estabelece os limites máximos de contaminantes em fertilizantes orgânicos e condicionadores de solo, independentemente se o produto contém lodo de esgoto ou somente resíduos da atividade agropecuária em seu conjunto de matérias-primas (MAPA, 2016).

A legislação mais atualizada do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), é por meio da Instrução Normativa SDA Nº 61 de 08/07/2020, que estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura (MAPA, 2020).

O tratamento do lodo de esgoto pode ser feito por meio de vários processos que o torna um produto útil. Dentre as utilidades, destaca-se a produção de biogás, a geração de energia, a fabricação de tijolos, a produção de cimento, o reaproveitamento agrícola, a calagem e a compostagem (Usman *et al.*, 2012). Atualmente a destinação final mais comum é dispor em aterros

sanitários, com grande tendência de ser restringida, pois há alternativas sustentáveis para esse resíduo orgânico, como reaproveitamento agrícola (Gomes *et al.*, 2013). No Brasil, a aplicação de lodo de esgoto higienizado em áreas agrícolas está restrita a poucos estados, como São Paulo, Paraná, Rio Grande do Sul, Distrito Federal e o Espírito Santo (Sampaio, 2013).

O processo de higienização contempla ações físicas, químicas e microbiológicas com o objetivo de eliminar os microrganismos patogênicos. Uma alternativa de higienização do lodo de esgoto é a compostagem antes da aplicação no solo cuja finalidade é de mineralizar os compostos orgânicos e eliminar os microrganismos patogênicos, produzindo assim um material com adequada qualidade sanitária e nutricional (Sullivan *et al.*, 2002).

A aplicação do composto orgânico de ETE na agricultura é vantajosa, pois viabiliza a reciclagem dos nutrientes minerais, disponibiliza melhor a matéria orgânica devido à estabilização de agregados do solo e reduz o uso de fertilizantes minerais (Silva *et al.*, 2001). Por ser rico em nitrogênio, fósforo e em menores concentrações de potássio, quando aplicado numa cultura otimiza o crescimento e produtividade da planta e por ter altas concentrações de macronutrientes, de micronutrientes e de matéria orgânica, promove efeitos físicos e químicos benéficos no solo, o qual pode-se não obter com o uso dos fertilizantes minerais (Usman *et al.*, 2012).

O composto orgânico de ETE melhora a densidade, a porosidade e a fertilidade do solo, aumenta a capacidade de retenção de água e de troca de cátions (CTC), e promove o crescimento de organismos do solo importantes para a reciclagem dos nutrientes minerais (Malta, 2001). A compostagem é uma estratégia eficaz para o reaproveitamento do lodo de esgoto, transformando este produto em um fertilizante nitrogenado para aplicação na agricultura (Rasapoor *et al.*, 2009).

Para efeito do presente trabalho, é importante definir os termos “lodo de esgoto” e “biossólidos”. Lodo de esgoto é o resíduo sólido das estações de tratamento de esgoto, não introduzidos nos ciclos de recuperação e reciclagem. Biossólidos são os sólidos, após adequação e tratamento, em qualquer forma, destinados para uso agrícola (Spinosa, 2021). Neste trabalho o biossólido será denominado como composto orgânico de ETE, ou seja, o lodo de esgoto que

recebeu tratamento através do processo de compostagem e está condicionado para uso agrícola.

2.3 Compostagem de lodo de esgoto sanitário

Desde a história antiga, os povos gregos, romanos e orientais sabiam que os resíduos orgânicos podiam contribuir com a fertilidade do solo. Estes povos compostavam os resíduos em montes de esterco com palha molhada em urina. A partir de 1920, Albert Howard iniciou a pesquisa de forma científica e, por décadas, foram divulgados trabalhos para desenvolver cada vez mais o processo de compostagem que atualmente pode ser encontrado em escala industrial (Fernandes, F.; Silva 2000).

A compostagem é aplicada a resíduos provenientes de diversas fontes como resíduos urbanos, agroindustriais, agropecuários, lodo de esgoto sanitário e agentes estruturantes como cama de aviário, casca de arroz, serragem e maravalha (Vergnoux *et al.* 2009). Os microrganismos patogênicos ao homem, quando presentes no lodo de esgoto, podem ser eliminados por diversas tecnologias, sendo a compostagem reconhecida por sua eficiência na higienização dos produtos fabricados a partir de resíduos orgânicos. A higienização é necessária para a utilização do lodo de esgoto na agricultura (Sullivan *et al.*, 2002).

A compostagem deve ser feita agrupando o composto em leiras com formato triangular ou pilhas, com as dimensões mínimas de 3 metros comprimento, 2 metros de largura e no máximo 1,8 metros de altura. Sendo necessário uma homogeneização com revolvimentos periódicos para renovação do ar aquecido dentro das leiras (Handreck, 1978). A compostagem se define pela degradação oxidativa feita por microrganismos mesofílicos e termofílicos que fazem a conversão da matéria orgânica sob condições controladas, gerando um produto biologicamente estável sem impactos ambientais (Stentiford, 1996). Essas condições controladas se refletem no monitoramento e ajustes feitos nas combinações dos fatores de aeração, nutrientes, teor de umidade, pH, temperatura, relação C/N dos materiais selecionados, granulometria, dimensões

das leiras e microrganismos, com o objetivo de atingir a melhor performance do processo (Ingelmo *et al.*, 2012).

A compostagem acontece devido a população diversificada de microrganismos, principalmente as bactérias e fungos, que estão originalmente presentes nos resíduos que serão misturados para a formação das leiras (Pereira Neto, 2007). Esses agentes biológicos fazem a decomposição da matéria orgânica e se sucedem ao longo do processo. Um importante fator para a eficiência da compostagem é a promoção da aeração para disseminar ar nas partículas do composto. O oxigênio é fundamental para o crescimento dos microrganismos e a atividade de aeração pode ocorrer por meio de revolvimento com uso de máquina ou por aeração forçada fornecida por equipamento de insuflação ou aspiração de ar (Torres de Carvalho, 2002).

Essa população diversificada de microrganismos é dividida em dois grupos: os microrganismos mesofílicos e os microrganismos termofílicos. De acordo com a Associação Americana de Obras Públicas (APWA, 1970), os microrganismos mesofílicos possuem uma temperatura ideal para se multiplicar entre 25 °C e 40 °C, já os microrganismos termofílicos possuem uma temperatura ideal para se multiplicar entre 40 °C e 70 °C.

A temperatura é a variável chave para o monitoramento da evolução da compostagem, pois reflete a atividade microbiana e permite detectar alterações ocorridas durante o processo. A fase inicial da compostagem é iniciada em até 48 horas após a montagem da leira, e nesta fase, a temperatura apresenta um aumento gradativo variando entre 25 °C e 40 °C (Alavi *et al.*, 2017). Quando a temperatura se eleva acima de 45 °C, a atividade biológica dos microrganismos mesófilos diminui, pois não resistem a altas temperaturas, morrendo ou ficando dormentes. Porém quando ocorrer a redução da temperatura, possibilitará a recolonização (Inácio; Miller, 2009). A duração da fase mesofílica é rápida, levando até 10 dias para a temperatura passar dos 45 °C. Com a elevação da temperatura, acontece a redução dos microrganismos mesófilos e colonização de microrganismos termófilos extremamente ativos (Oliveira *et al.*, 2008).

A fase seguinte é denominada de termofílica, onde ocorre elevada liberação de calor, vapor de água e gás carbônico. A temperatura pode chegar a 70 °C, devido à alta atividade microbiológica que provoca a morte dos microrganismos patogênicos presentes no lodo de esgoto (Khalil, 2011). A fase

termofílica pode durar mais de 60 dias, dependendo da quantidade e do material utilizado na compostagem (Lopez-Gonzalez *et al.*, 2013). O valor médio ideal para a degradação estável é de 55 °C (Pereira Neto, 2007).

À medida que a matéria orgânica de mais fácil biodegradação se esgota, a ação dos microrganismos termofílicos diminui, e a temperatura começa a declinar entre 30 °C e 45 °C permitindo que os mesofílicos se instalem novamente, porém com atividade mais lenta. Neste momento, inicia-se a fase mesofílica denominada de maturação, em que ocorre a diminuição da temperatura devido a redução da atividade da microbiota, a eliminação dos microrganismos patogênicos remanescentes, a mineralização e a humificação do composto orgânico que atinge as propriedades benéficas ao solo e plantas (Alvarenga *et al.*, 2015). A etapa da maturação é essencial para que se obtenha um composto maturado, estabilizado e humificado, podendo levar entre 30 e 60 dias para sua finalização (Oliveira *et al.*, 2008).

Microrganismos presentes nos materiais selecionados para a compostagem utilizam a matéria orgânica in natura como fonte de energia, de nutrientes minerais e carbono, promovendo a mineralização de parte do material e a humificação da outra parte do material (Budziak *et al.* 2004). O processo de mineralização transforma o material inicial em água, gás carbônico e sais inorgânicos, já o processo de humificação converte a matéria orgânica recente em húmus, que são materiais orgânicos de alto peso molecular como ácido fúlvicos, ácidos húmicos e humina (Garg *et al.*, 2006).

Na fase do processo de compostagem chamada de biodegradação rápida, há um grande consumo de oxigênio e a temperatura é elevada devido a intensa atividade microbiológica para a decomposição da matéria orgânica. Dessa forma, o composto não está pronto para ser usado. Na fase seguinte, ocorre a bioestabilização atingindo finalmente a maturação acompanhada da mineralização de determinados componentes da matéria orgânica, como nitrogênio, fósforo, cálcio e magnésio, que passam da forma orgânica para a inorgânica, ficando disponíveis às plantas (Kiehl, 1985). Na humificação ocorre a diminuição da atividade microbiológica e consequentemente a menor necessidade de aeração. Somente ao completar todo o ciclo da bioestabilização, o composto apresentará as propriedades físico químicas e biológicas desejadas (Figura 2) (Haug, 2018).

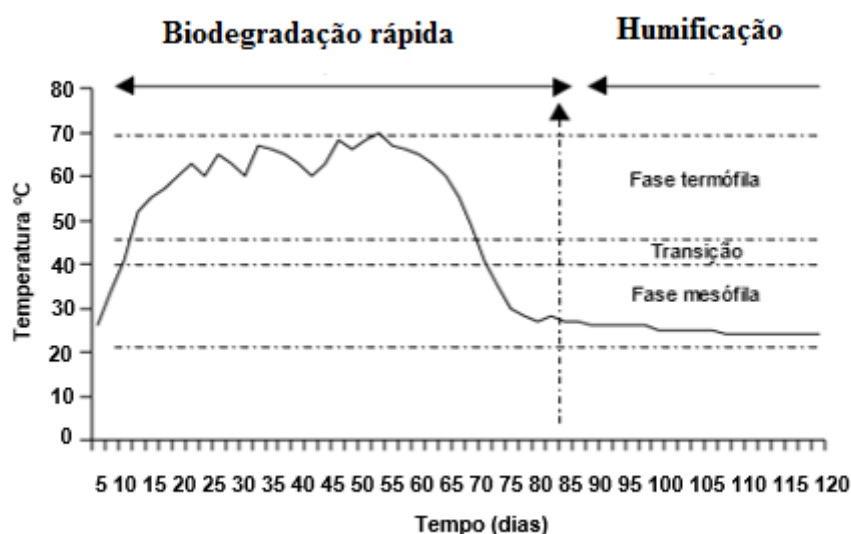


Figura 2: Comportamento da temperatura no processo de compostagem (Fernandes; Silva, 2000).

Outras variáveis importantes para o processo de compostagem são umidade, pH e a relação carbono e nitrogênio do material. A umidade deve estar dentro da faixa de 40% a 60%, sendo o valor ideal de 55%. Teores baixos impactam na atividade microbológica, portanto deve ser feita adição de água na leira. Teores altos prejudicam a passagem de ar pelos espaços vazios do composto, e nesse caso o revolvimento frequente e a aeração forçada ajudam no excesso de água. A relação carbono e nitrogênio devem estar na faixa 25 a 35:1, pois os microrganismos precisam de carbono como fonte de energia e de nitrogênio para sua reprodução. O pH ideal é entre 6 a 9, pois valores fora dessa faixa reduzem a atividade microbiana (Herzel *et al.*, 2016)

O lodo de esgoto não consegue se auto compostar devido à baixa relação C/N, alto teor de umidade e ser muito compacto. Então, é necessário a adição de agente de volume rico em carbono para ser o suporte estrutural e criar vazios entre as partículas. Diferentes materiais estruturantes podem ser misturados ao lodo de esgoto, tais como: serragem, farelo de trigo e cascas de aveia (Oarga-Mulec *et al.*, 2019); palha e cacas de arroz (Hashemi *et al.*, 2019); cacas de dendê e de vagem de cacau (Nartey *et al.*, 2017) e bagaço de cana (Berendes *et al.*, 2015) para formar a leira de compostagem.

A compostagem tem o tempo médio de duração de 120 dias, e esta técnica pode ser usada para a higienização do lodo de esgoto, devido à elevação da temperatura durante a biooxidação e o tempo de exposição. Como resultado do processo, o composto orgânico produzido é um material higiênico, maturado, de odor não agressivo, rico em substâncias húmicas e isento de patógenos, com grande aptidão agrônômica fornecendo nutrientes para as plantas e um importante condicionador de solo (Verlicchi; Zambello, 2015).

O fluxograma típico do processo de compostagem consiste em recebimento dos resíduos brutos, análises prévias dos resíduos, trituração do material estruturante para ser misturado ao lodo de esgoto e serem dispostos em leiras. Nesta condição, ocorre o desprendimento de calor na fase termofílica, com monitoramento do processo, ocorre depois a maturação, faz-se o peneiramento e análises finais do composto orgânico produzido o qual pode ser armazenado e manuseado sem riscos para a aplicação em áreas agrícolas (Figura 3) (Schaub; Leonard, 1996).

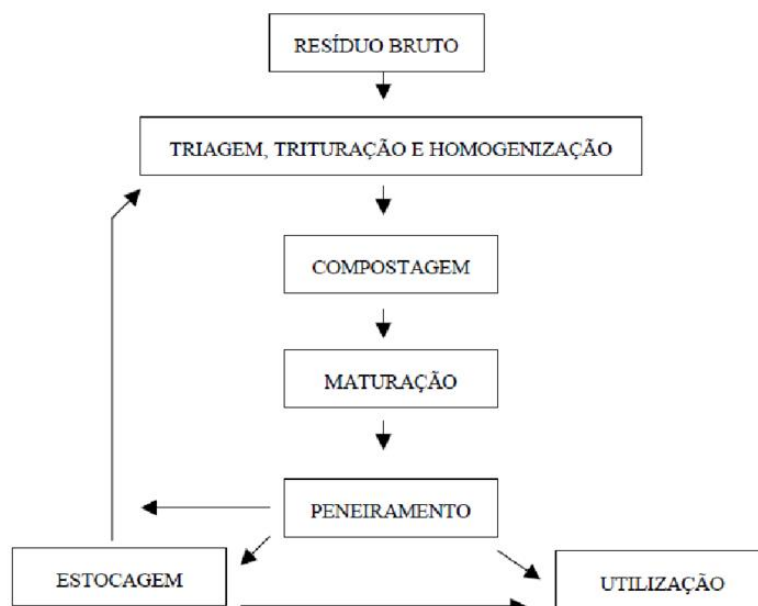


Figura 3: Fluxograma típico de um processo de compostagem (Schaub; Leonard, 1996).

2.4 Cultura do milho e adubação organomineral

A espécie do milho *Zea mays L.*, pertence à família das gramíneas, e a altura da planta varia entre 1 a 3 metros, possui porte ereto, sem ramificações,

as folhas são de formato lanceolado e a parte feminina das flores é a espiga, rica em proteínas e amido. Tem um ciclo vegetativo que dura entre 110 a 180 dias, mas pode chegar a 300 dias o período compreendido entre a emergência e a maturidade fisiológica (Ferreira *et al.*, 2003).

Os fatores que exercem influência no desenvolvimento das plantas são a radiação solar, temperatura, teor de água no solo, manejo correto do solo, densidade populacional, épocas adequadas para semeadura e o fornecimento de nutrientes. (Fumagalli *et al.*, 2017). A produtividade média da cultura de milho no Brasil ainda é baixa ao ser comparado a outros países. Porém é possível alcançá-la com o melhor aproveitamento dos fatores ambientais como condições hídricas favoráveis, controle das pragas e principalmente a nutrição balanceada que atenda às exigências nutricionais da cultura (Coelho *et al.*, 2003).

O milho é a terceira cultura mais produzida no Brasil, atrás apenas da soja e cana-de-açúcar. Os maiores produtores brasileiros: Mato Grosso, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais. A produção do Mato Grosso é superior à de cada uma das demais regiões do País. Preços atrativos incentivam os investimentos no aumento de área, de produção e de produtividade, observado em todas as regiões (CONAB, 2023).

A importância econômica e nutricional do milho vai desde a fabricação de ração animal que representa a maior parte do consumo total variando entre 70 a 90%, a alimentação humana e produção de energia na fabricação de etanol (Ribeiro, 2014). O uso do milho na produção de etanol está restrito aos estados de Mato Grosso, Goiás e Paraná, tendo previsão de elevação de 10,7%, em 2022/23, para 3,84 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2023).

O milho é um dos cereais mais cultivados no mundo, onde foram produzidas 1,15 bilhões de toneladas na média dos últimos três anos. O Brasil é o terceiro maior produtor mundial, depois dos Estados Unidos e da China (FAO, 2020). Os Estados Unidos têm a maior produtividade com aproximadamente 12 toneladas por hectare, já o Brasil fica em torno de 5,2 toneladas por hectare (BOIAGO *et al.*, 2017). Rússia e Ucrânia somam 14% das exportações mundiais de milho. A China é o segundo maior produtor e consumidor mundial, além de maior importador, e procura fornecedor alternativo à Ucrânia, devido a guerra entre Rússia e Ucrânia. O Brasil é um fornecedor em grande potencial. (USDA, 2022).

O Conab divulgou em novembro de 2023 o levantamento do acompanhamento da safra brasileira 2023/24, o plantio do milho primeira safra alcançou 40,2% da área prevista. Para a safra 2023/24 é estimado o plantio de 4.100,4 mil hectares, 21.135,4 mil ha de área plantada, 5.634 kg/há de produtividade e 119.066,4 mil t de produção (CONAB, 2023).

A principal preocupação dos produtores brasileiros é com o alto custo dos fertilizantes. Para o milho safra verão e de segunda safra, 2022/23, os custos orçados pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada (Cepea), em março/22, subiram 30,6% e 31%, em relação a fevereiro/22, já em relação a março/21, elevaram-se 91,5% e 119,1%, respectivamente (Agrolink, 2022).

Pode ser observado na Tabela 3 a produção brasileira deverá crescer nos próximos anos, o cenário externo é favorável e os preços internos ainda estão atrativos. Dependendo dos acontecimentos relacionados ao cenário internacional, a área plantada ainda poderá crescer, mesmo de forma secundária em relação à soja. Os fertilizantes deverão representar um custo crítico para a safra 2022/23 (Brasil, 2021).

Tabela 3: Dados Observados e Projeções de Produção e de Consumo de Milho (Brasil 2021-2027) Fonte: Adaptado de Brasil (2021)

Indicador	2021/22	2022/23	2023/24	2024/25	2025/26	2026/27
Produção de milho (Milhões de toneladas)	115,2	104,0	106,5	109,0	111,5	114,0
Produção de milho (Variação em relação ao ano anterior, %)	32,3	-9,7	2,4	2,3	2,3	2,2
Consumo de milho (Milhões de toneladas)	77,1	76,1	78,1	79,5	81,3	82,7
Consumo de milho (Variação em relação ao ano anterior, %)	6,7	-1,3	2,6	1,8	2,3	1,7

A reciclagem de nutrientes é uma das práticas de gestão agrícola sustentável, e a aplicação de lodo de esgoto tratado na agricultura é valiosa devido ao aporte nutricional, menor custo e diminuição da necessidade de fertilizantes minerais. O uso de lodo de esgoto como adubo pode trazer uma redução em torno de 60% do uso de fertilizantes minerais. O composto orgânico de ETE oferece nitrogênio, fósforo, potássio e outros nutrientes importantes para o desenvolvimento das plantas (Antonkiewicz *et al.*, 2019).

O composto orgânico de lodo de esgoto se torna uma solução para expansão da área plantada e para o aumento da produtividade das áreas cultivadas, reduzindo os custos de produção (Kirchmann *et al.*, 2017). É necessário cuidado ao seu uso exclusivo na agricultura, por não possuir as concentrações ideais demandadas pelas culturas como se obtém no aporte dos fertilizantes minerais. Dessa maneira o desequilíbrio nas concentrações dos nutrientes presentes no lodo de esgoto pode gerar deficiências nutricionais nas culturas (Souza, 2004).

Segundo Tsutiya (2001), o composto orgânico quando em forma de grânulo pode ser misturado aos fertilizantes minerais granulados ou em pó, como carga para formulação mineral até atingir o padrão comercial equivalente a uma tonelada da formulação mineral. O autor também afirma que uma cultura indicada para adubação com esse material é o milho. Malavolta *et al.*, (1997) determinou a faixa ideal de nutrientes para atendimento à demanda nutricional do milho (Tabela 4).

Tabela 4: Faixa ideal de nutrientes para atendimento à demanda nutricional do milho (Malavolta *et al.*, 1997)

Nutrientes	Faixa ideal
Macronutrientes	g/kg
Nitrogênio	27,5-32,5
Fósforo	2,5-3,5
Potássio Solúvel	17,5-22,5
Cálcio	2,5-4
Magnésio	2,5-4
Enxofre	1,5-2
Micronutrientes	mg/kg
Boro	15-20
Cobre	0-20
Ferro	50-250
Manganês	50-150
Zinco	15-50
Níquel	-
Molibidênio	-

O efeito residual da adubação com composto orgânico de lodo de ETE nas culturas por sucessivos anos agrícolas se deve à sua capacidade de fornecer nutrientes de forma gradual, o que favorece a absorção pelas plantas, principalmente em relação ao nitrogênio, uma vez que este nutriente apresenta alta mobilidade no solo, podendo ser facilmente perdido por lixiviação. Este fornecimento gradual de nutrientes ao solo ocorre em virtude do nitrogênio e do fósforo estarem presentes no lodo, em sua maior parte, na forma orgânica. Portanto as quantidades disponibilizadas às culturas dependem da cinética de mineralização da matéria orgânica (Castro; Gómez, 2001).

O potássio é encontrado em baixas concentrações no lodo de esgoto, mas diferentemente do nitrogênio e do fósforo, a maior parte deste elemento se encontra na forma mineral, estando prontamente disponível para as plantas (Deschamps; Favaretto, 1999). No entanto, este tem sido o elemento de maior necessidade de complementação com fertilizantes minerais, quando da utilização de lodo de esgoto para a adubação (Nascimento *et al.*, 2004).

De acordo com o Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (Prosab, 1999), as quantidades de magnésio e enxofre presentes no lodo são suficientes para suprir as necessidades da maioria das culturas, mesmo quando aplicado em pequenas doses. O lodo também apresenta em sua composição expressivas quantidades de micronutrientes como ferro, zinco e manganês, além de baixas quantidades de cobre, boro, molibdênio e cloro (Gomes, 2004).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Produzir composto orgânico a partir de lodo de estação de tratamento de esgoto, caracterizar sua qualidade nutricional e sanitária, e estudar o seu efeito na substituição parcial da adubação mineral para a cultura do milho.

3.2 Objetivos Específicos

A: Produzir composto orgânico a partir da compostagem de lodo de estação de tratamento de esgoto (ETE);

B: Analisar a qualidade do composto orgânico produzido quanto aos aspectos microbiológicos, presença de metais e teor de nutrientes de interesse agrícola;

C: Avaliar o efeito do composto orgânico produzido na substituição parcial de fertilizantes minerais em plantas de milho quanto aos aspectos morfológicos e fisiológicos.

4 METODOLOGIA

4.1 Compostagem

Localização da área experimental

O lodo de esgoto foi fornecido em maio de 2021 pela Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Esplanada, da Concessionária Águas do Paraíba, localizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ (Figura 4).

O município de Campos dos Goytacazes localiza-se na região norte do estado do Rio de Janeiro, com uma população estimada de 511 mil habitantes. A Concessionária Águas do Paraíba que é responsável pelo saneamento básico do município. Para tanto implementou nove estações de tratamento de esgoto, que produzem 300 toneladas de lodo de esgoto. Tal lodo, passa pelo processo de desidratação por centrífuga seguido por leito de secagem ao ar livre de 20 a 30 dias com retirada do lodo com 20% de matéria seca a ser destinado ao aterro sanitário.

A Concessionária busca alternativas sustentáveis para a disposição final do lodo de esgoto gerado e consolidou um acordo de cooperação com a Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) com o objetivo de unir os esforços acadêmicos, científicos, tecnológicos e humanos comuns visando o desenvolvimento de “Biotecnologias aplicadas à Bioconversão de Resíduos de Estações de Tratamento de Esgoto”. Está sendo implementado desde 2022 uma Unidade Integrada de Pesquisa com desenvolvimento de compostagem e no início de 2023 foi feita aplicação do composto orgânico na cultura de milho, soja e sorgo em campo.



Figura 4: ETE Esplanada da Concessionária Águas do Paraíba

4.1.2 Caracterização dos materiais utilizados na compostagem

Com a finalidade de caracterizar o lodo de esgoto bruto e determinar seu potencial agronômico, foram realizadas análises no laboratório especializado Laborsolo localizado em Londrina/PR. De acordo com a Tabela 5, na caracterização agronômica, os teores dos macronutrientes N, P e K no lodo de esgoto bruto foram de: 3,41% para o Nitrogênio; 1,56% para o Fósforo e 0,04% para o Potássio. Os demais macronutrientes foram de 2,00% para o Cálcio; 0,43% para o Magnésio; 1,42% para o Enxofre. Os teores de micronutrientes no lodo de esgoto bruto foram de: não detectável para o Boro; 237,1 mg kg⁻¹ para o Cobre; 23.560,0 mg kg⁻¹ para o Ferro.; 305,2 mg kg⁻¹ para o Manganês; 892,4 mg kg⁻¹ para o Zinco; 35,59 mg kg⁻¹ para o Níquel e não detectável para o Molibdênio.

Tabela 5: Potencial agrônômico do lodo de esgoto bruto antes da higienização.

Caracterização Agrônômica		
Macronutrientes		%
N	Nitrogênio	3,41
P	Fósforo	1,56
K	Potássio Solúvel	0,04
Ca	Cálcio	2,00
Mg	Magnésio	0,43
S	Enxofre	1,42
Micronutrientes		mg kg ⁻¹
B	Boro	N.D.
Cu	Cobre	237,1
Fe	Ferro	23.560,0
Mn	Manganês	305,2
Zn	Zinco	892,4
Ni	Níquel	35,59
Mo	Molibdênio	N.D.

Com a finalidade de caracterizar o lodo de esgoto bruto e determinar seu risco patogênico, foram realizadas análises no laboratório especializado *Oceanus* localizado no Rio de Janeiro/RJ. De acordo com a Tabela 6, a quantidade de ovos e larvas viáveis de Helmintos foram de 93,32 ovos e larvas por grama de lodo; o número mais provável por gramas de matéria seca de *Salmonella* sp. foram de 1.600 em 10 gramas de lodo e o número mais provável por gramas de matéria seca *Escherichia coli* foi de 160.000 por grama de lodo.

Tabela 6: Caracterização microbiológica e valores máximos de microrganismos patogênicos no lodo de esgoto bruto antes da higienização

Caracterização Microbiológica		CONAMA 498/2020 Art. 9	
Determinação	Resultados	Classe A:	Classe B:
Ovos e larvas viáveis de Helmintos (ovos e larvas/g)	93,32	<1,00	<1,00
<i>Salmonella</i> sp. (NMP/10g)	$1,6 \times 10^3$	Ausência	Ausência
<i>Escherichia coli</i> (NMP/g ST)	$1,6 \times 10^5$	$1,0 \times 10^3$	$1,0 \times 10^6$

Com a finalidade de caracterizar a relação C/N do resíduo lodo de esgoto e o material estruturante cavaco de madeira, foram realizadas análises com laboratório especializado Oceanus localizado no Rio de Janeiro/RJ. O lodo de esgoto cru apresentou uma baixa relação C/N de 10/1, alta umidade em torno de 75% e pH 8,49. O cavaco de madeira apresentou relação C/N de 385/1 e umidade 43% (Tabela 7).

Tabela 7: Relação C/N dos materiais utilizados na compostagem: lodo de esgoto bruto e cavaco de madeira

Relação C/N	Lodo de esgoto	Cavaco de madeira
Carbono (g/kg)	332,7	558,6
Nitrogênio (g/kg)	34,1	1,45
Relação C/N	10/1	385/1
Umidade (%)	74,53	43,42
pH	8,49	-

4.1.3 Processo de compostagem do lodo de ETE

Para a realização do presente trabalho, o lodo de esgoto foi coletado imediatamente após sua saída da centrífuga a 80% de umidade, e sua higienização foi feita em uma planta piloto de compostagem, localizada na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Esplanada, da Concessionária Águas do Paraíba, localizada no município de Campos dos Goytacazes-RJ (Figura 5).



Figura 5: Planta piloto de compostagem na ETE Esplanada

Para a compostagem, foi realizada a mistura de 1 volume de lodo de esgoto centrifugado para 2 volumes de cavaco de madeira (material estruturante). Em seguida, essa mistura foi disposta em 3 leiras, nas dimensões de 2 x 1,5 x 3 m de largura, altura e comprimento, respectivamente, totalizando um volume de 4,5 m³ de mistura por leira. A promoção da aeração do material foi realizada pelo revolvimento periódico por uma retroescavadeira a cada 2 dias por meio de transposição das leiras (Figura 6).



Figura 6: Montagem das leiras de compostagem

O monitoramento do processo de compostagem foi feito por meio da medição da temperatura. Em cada tempo de medição, foram avaliados três pontos na base da leira, três pontos no meio da leira e três pontos no topo da leira. O primeiro ponto de cada altura da leira foi a posição frontal, o segundo

ponto foi a posição lateral e o terceiro ponto foi a posição posterior da leira no sentido horário. Durante o processo de compostagem, a temperatura foi monitorada diariamente, utilizando um termômetro analógico com haste de 50 cm, marca AI RAN 0-120. Esses dados foram registrados e o tempo do processo de compostagem foi de 180 dias (Figura 7).



Figura 7: Monitoramento das leiras de compostagem

4.1.4 Caracterização do composto orgânico

Aos 180 dias da compostagem, três amostras do composto orgânico de ETE de cada leira foram coletadas. Cada amostra foi composta por três pontos da leira em diferentes profundidades (superfície, 30 cm e 60 cm) e levadas para laboratórios de referência, habilitados para realizar as análises e emissão de laudos de qualidade nutricional, qualidade microbiológica e metais. As análises microbiológicas e de metais foram realizadas no Laboratório Oceanus localizado no Rio de Janeiro/RJ, os laudos resultantes foram confrontados com os padrões estabelecidos na legislação vigente Resolução CONAMA nº 498/2020 (BRASIL, 2020). As análises nutricionais foram realizadas pelo Laboratório Laborsolo localizado em Londrina/PR, com intuito de verificar se o composto orgânico de ETE atende aos padrões estabelecidos em relação ao potencial agrônomo para atendimento às exigências nutricionais da cultura de milho de acordo com a faixa ideal estabelecida por Malavolta *et al.* (1997).

4.2 Efeito do composto orgânico com diferentes proporções de fertilizantes minerais na cultura do milho

4.2.1 Localização da área experimental

O experimento foi realizado no mês de junho de 2022 em casa de vegetação do Centro de Biociências e Biotecnologia (CBB) da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) em Campos dos Goytacazes-RJ, localizada a 21° 19' 23" de latitude sul e 41° 19' 40" de longitude oeste com altitude variando de 20 a 30 m no município.

Segundo a classificação de Köppen o clima da região é o Aw, com verão chuvoso e inverno seco. A temperatura média anual é de 23.9 °C e a pluviosidade média anual é de 1112 mm.

4.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos consistiram nas doses do composto orgânico de ETE e fertilizantes minerais que foram aplicados na variedade de milho Feroz 506 vip3, conforme a Tabela 8 e as descrições abaixo:

- O tratamento **controle** não recebeu adubação;
- Tratamento **AM** corresponde a adubação mineral de referência (NPK) para a cultura do milho em kg/ha (165, 300, 200, respectivamente);
- O tratamento **AOM100%** corresponde à adição equivalente a 5 t/ha de composto orgânico, complementado com nutrientes NPK nas quantidades de 83, 274, 199 kg/ha, respectivamente, de modo a atingir o aporte de nutrientes fornecidos no tratamento AM.
- O tratamento **AOM75%** corresponde à adição equivalente a 5 t/ha de composto orgânico, complementado com nutrientes NPK nas quantidades de 62, 205, 151 kg/ha respectivamente, equivalente a 75% dos nutrientes minerais fornecidos no tratamento AM100%;

- O tratamento **AOM50%** corresponde à adição equivalente a 5 t/ha de composto orgânico, complementado com nutrientes NPK nas quantidades de 41, 137, 101 kg/ha respectivamente, equivalente a 50% dos nutrientes minerais fornecidos no tratamento AM100%;
- O tratamento **AOM25%** corresponde à adição equivalente a 5 t/ha de composto orgânico, complementado com nutrientes NPK nas quantidades de 21, 68, 50 kg/ha respectivamente, equivalente a 25% dos nutrientes minerais fornecidos no tratamento AM100%;

Tabela 8: Doses e fontes aplicados nos tratamentos

Nutrientes	Fonte	Taxa de aplicação	Tratamentos					
			Cont.	AM	AOM100%	AOM75%	AOM50%	AOM25%
N	Ureia	kg/ha	0	165	83	62	41	21
P	Superfosfato Simples	kg/ha	0	300	274	205	137	68
K	Cloreto de Potássio	kg/ha	0	200	199	151	101	50
CO	Composto Orgânico	ton./ha	0	0	5	5	5	5

Os níveis de adubação orgânica foram definidos com base na Resolução CONAMA nº 498 (Conama, 2020) considerando o teor de nitrogênio do composto orgânico de ETE e na exigência nutricional da cultura do milho por Malavolta *et al.*, 1997 e Manual Milho Informações Básicas de Cultivo por PESAGRO-RIO, 2022.

4.2.3 Substratos utilizados no cultivo de milho

Os substratos utilizados para preenchimento dos vasos foram: o composto orgânico de ETE; o solo latossolo vermelho que foi coletado na camada 0-20 cm de profundidade na área da Unidade Integrada de Pesquisas da ETE Esplanada em Campos dos Goytacazes, a adubação foi baseada nas exigências nutricionais da cultura de milho e conforme resultados das análises de solo e do aporte nutricional do composto orgânico de ETE. Como fonte dos nutrientes do fertilizante mineral NPK, foram utilizados a ureia (165 kg/ha de N),

o superfosfato simples (300 kg/ha de P_2O_5) e o cloreto de potássio (200 de KCL) equivalente a formulação NPK 165-300-200 (Figura 9). A caracterização química do solo foi feita, conforme tabela 9.

Tabela 9: Caracterização química do solo utilizado no experimento

Propriedades e características	
Determinação	cmolc/dm ³
CTC (pH 7,0)	16,08
CTC (efetiva)	14,03
Determinação	g/dm ³
Matéria Orgânica	13,8
Determinação	mg/L
Fósforo Remanecente	29,2
Macronutrientes catiônicos	
Elementos	mg/dm ³
Cálcio	11,49
Magnésio	2,17
Potássio	0,29
Sódio	0,08
Macronutrientes aniônicos	
Elementos	mg/dm ³
Fósforo Mehlich 1	15,08
Fósforo Mehlich 3	8,7
Micronutrientes	
Elementos	mg/dm ³
Cobre	1,15
Ferro	288,85
Manganês	104,64
Zinco	2,21

**Figura 8:** Substratos utilizados no experimento (solo, lodo de esgoto compostado e fertilizantes minerais NPK)

4.2.4 Cultivo das plantas

A variedade Feroz 506 vip3 de milho (*Zea mays L.*) foi utilizada para avaliar a performance do composto orgânico de ETE suplementado por fertilizantes minerais no desenvolvimento das plantas. O semeio foi realizado em vasos plásticos contendo 12 L de substrato, onde foram colocadas três sementes por vaso. As plantas foram mantidas em casa de vegetação por 45 dias, e irrigadas automaticamente por gotejamento em dias alternados (Figura 10).



Figura 9: Experimento do plantio de milho em vasos

4.3 Avaliações morfológicas e fisiológicas das plantas

4.3.1 Análises morfológicas

O comprimento de folha (CF), a largura de folha (LF), o diâmetro do colmo (DC) e o número de folhas (NF) foram determinados aos 45 dias do cultivo do milho. O CF e LF foram medidos com auxílio de régua graduada expressos em centímetros (cm). O DC foi medido a 5 cm do substrato com auxílio de paquímetro digital e expresso (mm). Essas características foram estimadas a partir de todas as plantas de cada vaso/tratamento (Figura 11).



Figura 10: Medição do diâmetro do colmo utilizando o paquímetro de uma das análises morfológicas

O peso fresco e seco da parte aérea e raiz foram determinados aos 45 dias do cultivo do milho e expressos em gramas (g). Para tanto, a raiz foi separada da parte aérea e lavada em água corrente para retirada do substrato. As amostras foram acondicionadas em sacos de papel e devidamente identificadas. A secagem foi realizada em estufa de circulação forçada de ar, a 65 °C, por 72 horas. As pesagens foram realizadas em balança de precisão. Essas características foram estimadas a partir de todas as plantas de cada vaso/tratamento (Figura 12).



Figura 11: Retirada das plantas de milho do vaso

4.3.2 Análises fisiológicas

A intensidade de cor verde das folhas foi estimada por meio de um Medidor Portátil de Clorofila, modelo SPAD-502 “*Soil Plant Analyser Development*” (Minolta, Japão) aos 45 dias do cultivo. Para tanto, foram realizadas três leituras ao longo da folha e utilizada a média para compor cada repetição. Foi avaliada a sexta folha a partir da ponta da planta, recentemente expandidas em cada planta, evitando a nervura central, e no período da manhã. As medições dos índices de vegetação: pigmentos foliares, verdor geral, eficiência de uso da luz, conteúdo de água foliar e estresse da planta pela reflectância de senescência foram avaliadas no mesmo horário, nas mesmas folhas e na mesma área da folha utilizada para as medições da intensidade da cor verde aos 45 dias do cultivo. O equipamento Espectrômetro de folhas SpectraVue CI-710s foi utilizado para a medição. Foi avaliada a sexta folha a partir da ponta da planta, recém- expandidas, uma medida por folha em cada planta, evitando a nervura central, e no período da manhã.

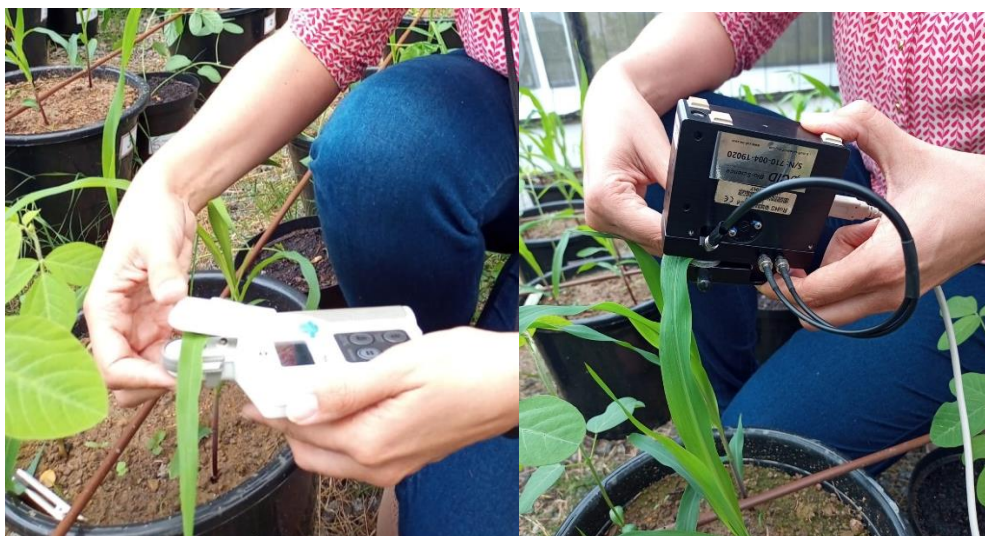


Figura 12: Medição dos índices de vegetação para as análises fisiológicas utilizando os equipamentos clorofilômetro SPAD 502 e SpectraVue CI-710s

4.3 Análise dos dados

Os dados obtidos das análises morfológicas e fisiológicas das plantas foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F e as médias dos

tratamentos comparadas pelo teste de Tukey considerando nível de significância de 5%. O programa estatístico GraphPad Prism, versão 8.0.1, foi utilizado para a análise.

5 RESULTADOS

5.1 Compostagem de lodo de esgoto

5.1.1 Produção do composto orgânico de ETE

A produção do composto orgânico de ETE para aplicação agrícola, foi realizada através do processo de compostagem. As três fases do processo: fase inicial da compostagem (fase mesofílica), biodegradação rápida (fase termofílica) e maturação/humificação (fase mesofílica) ocorreram de forma definida e atingindo a estabilização da matéria orgânica, bem como a higienização do lodo de esgoto.

Na Figura 14 são apresentados os dados diários de temperatura média e temperatura máxima do processo entre o 1º ao 180º dia de compostagem.

No início da compostagem, a temperatura média das leiras foi próxima de 30 °C. Em menos de 24h, a temperatura média das leiras atingiu 50 °C, com eventos de temperaturas a 70 °C, devido a alta atividade microbiológica e alta degradação da matéria orgânica. Ao longo dos primeiros 45 dias da compostagem, a temperatura máxima atingiu diversos picos de 70 °C e a temperatura média atingiu 63 °C, propiciando a eliminação dos microrganismos patogênicos e a higienização do lodo de esgoto. A compostagem teve duração de 150 dias.

Entre o 80º e o 112º dia, houve um decaimento da temperatura abaixo dos 40 °C possivelmente devido redução dos níveis de umidade da leira, onde houve a necessidade do ajuste da umidade por adição de água. Após a rehidratação das leiras, houve recuperação da temperatura acima de 40 °C, evidenciando a reativação de microbiota.

A medida que a matéria orgânica de mais fácil biodegradação foi se esgotando, o decaimento da temperatura atingiu abaixo de 40 °C. Assim, se iniciou a fase de maturação dos 150º ao 180º dia, com duração de 30 dias. Nesta fase ocorreu a diminuição da temperatura alcançando a faixa de 35 °C.

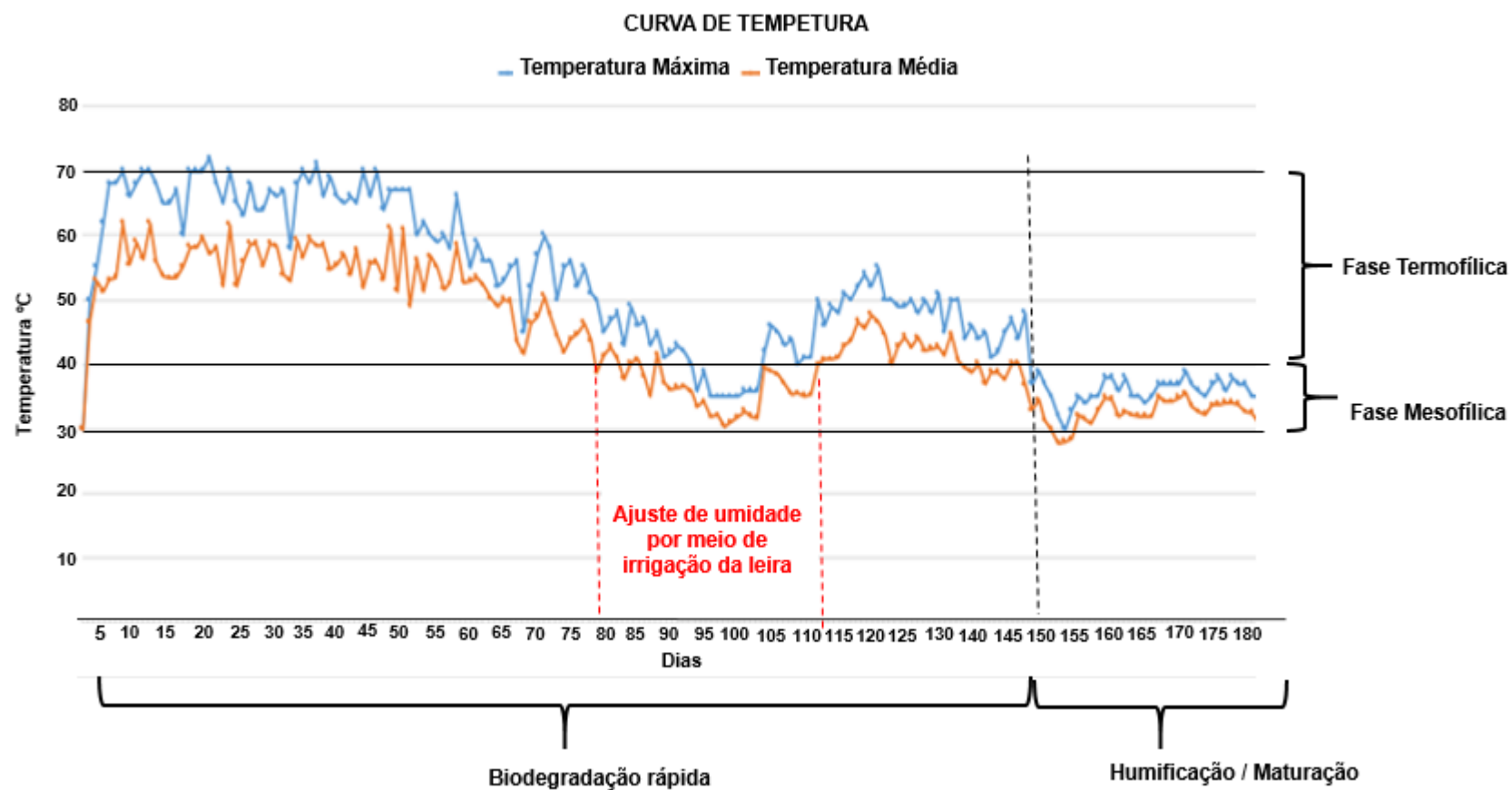


Figura 13: Curva de temperatura das fases da compostagem do lodo de esgoto

5.1.2 Qualidade nutricional do composto orgânico de ETE

Com a finalidade de analisar a qualidade nutricional do composto orgânico de ETE, foram realizadas análises laboratoriais. Os teores dos nutrientes foram de 1,64% para nitrogênio, 0,53% para fósforo, 0,04% para potássio, 1,16% para cálcio, 0,24% para magnésio, 0,32% para enxofre, 32,89 mg kg⁻¹ para boro, 113,0 mg kg⁻¹ para cobre, 14.930,0 mg kg⁻¹ para ferro, 216,6 mg kg⁻¹ para manganês, 342,1 mg kg⁻¹ para zinco, 37,31 mg kg⁻¹ para níquel e 1,11 mg kg⁻¹ para molibdênio. Medição de 6,65 para pH, 53,46% para umidade, 40,41% para matéria orgânica e 5,15 Relação C/N. Os resultados apresentados atenderam ao padrão de qualidade para fertilizante orgânico de acordo com Instrução Normativa SDA nº 23 (MAPA, 2005), cujos níveis mínimos permitidos são de 1% para nitrogênio, mínimo de 6,0 para pH, máximo de 50% para umidade, mínimo de 40% matéria orgânica e máximo de 18 para relação C/N (Tabela 10).

Tabela 10. Potencial agronômico do composto orgânico de ETE utilizado no experimento

Caracterização Agronômica			Ministério da Agricultura
Macronutrientes		%	Instrução Normativa SDA nº 23 (MAPA, 2005)
N	Nitrogênio	1,64	Mínimo de 1%
P	Fósforo	0,53	-
K	Potássio Solúvel	0,04	-
Ca	Cálcio	1,16	-
Mg	Magnésio	0,24	-
S	Enxofre	0,32	-
Micronutrientes		mg kg-1	Instrução Normativa SDA nº 23 (MAPA, 2005)
B	Boro	32,89	-
Cu	Cobre	113	-
Fe	Ferro	14.930,00	-
Mn	Manganês	216,6	-
Zn	Zinco	342,1	-
Ni	Níquel	37,31	-
Mo	Molibdênio	1,11	-
Físico-Química			Instrução Normativa SDA nº 23 (MAPA, 2005)
pH em CaCl ₂		6,65	Mínimo de 6,0
Umidade em %		53,46	Máximo de 50%
Matéria Orgânica %		40,41	Mínimo de 40%
Carbono orgânico %		8,45	-
Carbono Total %		10,45	-
Relação C/N		5,15	Máximo 18/1

5.1.3 Qualidade microbiológica do composto orgânico de ETE

Com a finalidade de analisar a qualidade microbiológica do composto orgânico de ETE, aos 180 dias de compostagem, amostras foram avaliadas quanto a presença de microrganismos patogênicos.

De acordo com a Tabela 11, a quantidade de ovos e larvas viáveis de Helmintos foram de <0,10 por grama; o número mais provável por gramas de matéria seca de Salmonella sp. foi ausência em 10 gramas; e o número mais provável por gramas de matéria seca de Escherichia coli foi de 1.487,1 por grama do composto orgânico. Os resultados atenderam à faixa permitida para aplicação agrícola da Classe B da resolução CONAMA nº 498/2020, cujos níveis máximos permitidos de organismos patogênicos são: <1,00 de Ovos e

larvas viáveis de Helminthos/g, ausência de *Salmonella sp.* por NMP/10g e $1,0 \times 10^6$ de *Escherichia coli* NMP/g ST.

Tabela 101: Caracterização microbiológica e valores máximos de microrganismos patogênicos no composto orgânico de ETE a ser destinado para uso, em solos de acordo com o CONAMA 498/2020

Caracterização Microbiológica		CONAMA 498/2020 Art. 9	
Determinação	Resultados	Classe A:	Classe B:
Ovos e larvas viáveis de Helminthos (ovos e larvas/g)	<0,10	<1,00	<1,00
<i>Salmonella sp.</i> (NMP/10g)	Ausência	Ausência	Ausência
<i>Escherichia coli</i> (NMP/g ST)	$1,48 \times 10^3$	$1,0 \times 10^3$	$1,0 \times 10^6$

NMP é a estimativa da densidade de bactérias por número mais provável por gramas de matéria seca ou por sólidos totais (ST).

5.1.4 Teores de metais do composto orgânico de ETE

Com a finalidade de analisar os teores de metais do composto orgânico de ETE, aos 180 dias de compostagem, amostras foram avaliadas quanto a quantidade de metais. Os valores detectados foram: 1,69 mg/kg de arsênio, 164,92 mg/kg de bário, 0,56 mg/kg de cádmio, 27,38 mg/kg de chumbo, 125,2 mg/kg de cobre, 29,02 mg/kg de cromo, 0,23 mg/kg de mercúrio, 2,9 mg/kg de molibdênio, 14,9 mg/kg de níquel, 1,6 mg/kg de selênio e 443 mg/kg de zinco presentes no composto orgânico de ETE.

O composto orgânico, portanto, atende os parâmetros exigidos para aplicação agrícola, de acordo com a Classe B da resolução CONAMA nº 498/2020, cujo teores máximos são de 75 mg/kg de arsênio, 1.300 mg/kg de bário, 85 mg/kg de cádmio, 840 mg/kg de chumbo, 4.300 mg/kg de cobre, 3.000 mg/kg de cromo, 57mg/kg de mercúrio, 75mg/kg de molibdênio, 420 mg/kg de níquel, 100 mg/kg de selênio e 7.500 mg/kg de zinco: (Tabela 12).

Tabela 112: Caracterização química e valores máximos permitidos de metais no composto orgânico de ETE a ser destinado para uso, em solos de acordo com o CONAMA 498/2020

Contaminantes Inorgânicos		CONAMA 498/2020	
		Art. 10 - Classe A:	Art. 10 - Classe B:
Determinação	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Arsênio	1,69	41	75
Bário	164,92	1300	1300
Cádmio	0,56	39	85
Chumbo	27,38	300	840
Cobre	125,2	1500	4300
Cromo	29,02	1000	3000
Mercúrio	0,23	17	57
Molibênio	2,9	50	75
Níquel	14,9	420	420
Selênio	1,6	36	100
Zinco	443	2800	7500

5.2. Efeito do composto orgânico com diferentes proporções de fertilizantes minerais no desenvolvimento de plantas de milho

Com o objetivo de identificar as proporções de composto orgânico/fertilizantes minerais (NPK) mais efetivas para o cultivo de plantas de milho, um ensaio foi estabelecido, em casa de vegetação, onde plantas foram cultivadas durante 45 dias, em vasos contendo solo complementado com proporções equivalentes a dosagem para um hectare, com as seguintes concentrações de fertilizantes: zero de fertilizantes minerais e zero de composto orgânico (Controle); 165 kg/ha, 300 kg/ha e 200 kg/ha de NPK, respectivamente (Tratamento AM); 5 t/ha de composto orgânico, 83, 274, 199 kg/ha de NPK, respectivamente (Tratamento AOM100%); 5 t/ha de composto orgânico, 62, 205, 151 kg/ha de NPK, respectivamente (Tratamento AOM75%); 5 t/ha de composto orgânico, 41, 137, 101 kg/ha de NPK, respectivamente (Tratamento AOM50%) e 5 t/ha de composto orgânico, 21, 68, 50 kg/ha de NPK, respectivamente (Tratamento AOM25%).

Após 45 dias de cultivo, as plantas foram coletadas e avaliadas quanto ao peso fresco da parte aérea (PFPA), peso fresco de raízes (PFR), peso seco

da parte aérea (PSPA), peso seco de raízes (PSR), diâmetro do colmo (DC) e largura da sexta folha (LF). Os dados são apresentados na Figura 15.

Conforme apresentado na Figura 15B, as análises do peso fresco da parte aérea (PSPA) das plantas revelaram que o tratamento AM, onde apenas nutrientes minerais foram utilizados, promoveu acréscimo de 195,33%, em comparação às plantas controle (onde não foram adicionados fertilizantes). As plantas que receberam o tratamento AOM100%, onde se utilizou o equivalente a 5 ton./ha de composto orgânico, complementados com fertilizantes minerais suficientes para equivaler ao total de NPK oferecido no tratamento AM, observou-se um ganho de 305,60% em comparação ao tratamento controle. Os tratamentos AOM75% e AOM50%, onde se utilizou o equivalente a 5 ton./ha de composto orgânico complementados com 75% e 50% dos fertilizantes minerais oferecidos no tratamento AOM100%, respectivamente, geraram ganhos de 224,23% e 160,73%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Os resultados dos tratamentos AOM75% e AOM50% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. O tratamento AOM25% promoveu ganho de 115,91% em relação ao tratamento controle.

As análises de peso seco da parte aérea (PSPA) de plantas de milho (Figura 15C), revelaram que o tratamento AM, promoveu acréscimo de 144,79%, em comparação às plantas controle. Nas plantas que receberam o tratamento AOM100%, observou-se um ganho de 211,11% em comparação ao tratamento controle. O tratamento AOM75%, gerou um ganho de 134,03% em comparação ao tratamento controle. Os resultados do tratamento AOM75% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. Os tratamentos AOM50% e AOM25% promoveram ganho de 92,01% e 63,54%, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

As análises do peso fresco de raízes (PFR) das plantas (Figura 15D) evidenciaram que o tratamento AM promoveu redução de 9,56%, em comparação às plantas controle, não havendo diferença estatística. As plantas que receberam o tratamento AOM100% observou-se um ganho de 137,86% em comparação ao tratamento controle. Os tratamentos AOM75% e AOM50%, geraram ganhos de 59,66% e 31,55%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. O tratamento AOM25% promoveu ganho de 10,33 % em

relação ao tratamento controle. Os resultados do tratamento AOM25% não diferiram estatisticamente do tratamento AM.

Adicionalmente, as análises do peso seco de raízes (PSR) das plantas (Figura 15E) revelaram que o tratamento AM promoveu acréscimo de 47,75%, em comparação às plantas controle). As plantas que receberam o tratamento AOM100%, observou-se um ganho de 166,85% em comparação ao tratamento controle. Os tratamentos AOM75% e AOM50%, geraram ganhos de 102,81% e 87,64%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. O tratamento AOM25% promoveu ganho de 55,62 % em relação ao tratamento controle. Os resultados do tratamento AOM25% não diferiram estatisticamente do tratamento AM.

As análises de número de folhas (NF) das plantas (Figura 15F) demonstraram um aumento de 28% pelo tratamento AM em comparação às plantas controle. Os tratamentos AOM100% e AOM75% geraram ganhos de 33% e 28%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Os resultados dos tratamentos AOM100%, e AOM75% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. Os tratamentos AOM50% e AOM25% promoveram ganho de 18% e 15% em relação ao tratamento controle.

As análises de comprimento da folha (CF) das plantas (Figura 15G) indicaram que o tratamento AM promoveu acréscimo de 39%, em comparação às plantas controle. Os tratamentos AOM100% e AOM75% geraram ganhos de 33% e 32%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Os resultados dos tratamentos AOM100%, e AOM75% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. Os tratamentos AOM50% e AOM25% promoveram ganho de 20% e 18% em relação ao tratamento controle.

As análises do diâmetro do colmo (DF) das plantas (Figura 15H) revelaram que o tratamento AM promoveu acréscimo de 46%, em comparação às plantas controle. Os tratamentos AOM100% e AOM75% geraram ganhos de 38% e 37%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Os resultados dos tratamentos AOM100%, e AOM75% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. Os tratamentos AOM50% e AOM25% promoveram ganho de 22% e 21%, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

Adicionalmente, as análises de largura da folha (LF) das plantas (Figura 15I) indicaram que o tratamento AM promoveu acréscimo de 45%, em comparação às plantas controle. O tratamento AOM100% gerou ganhos de 47% em comparação ao tratamento controle. Os resultados dos tratamentos AOM100% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. Os tratamentos AOM75%, AOM50% e AOM25% promoveram ganho de 28%, 24% e 17%, respectivamente, em relação ao tratamento controle.

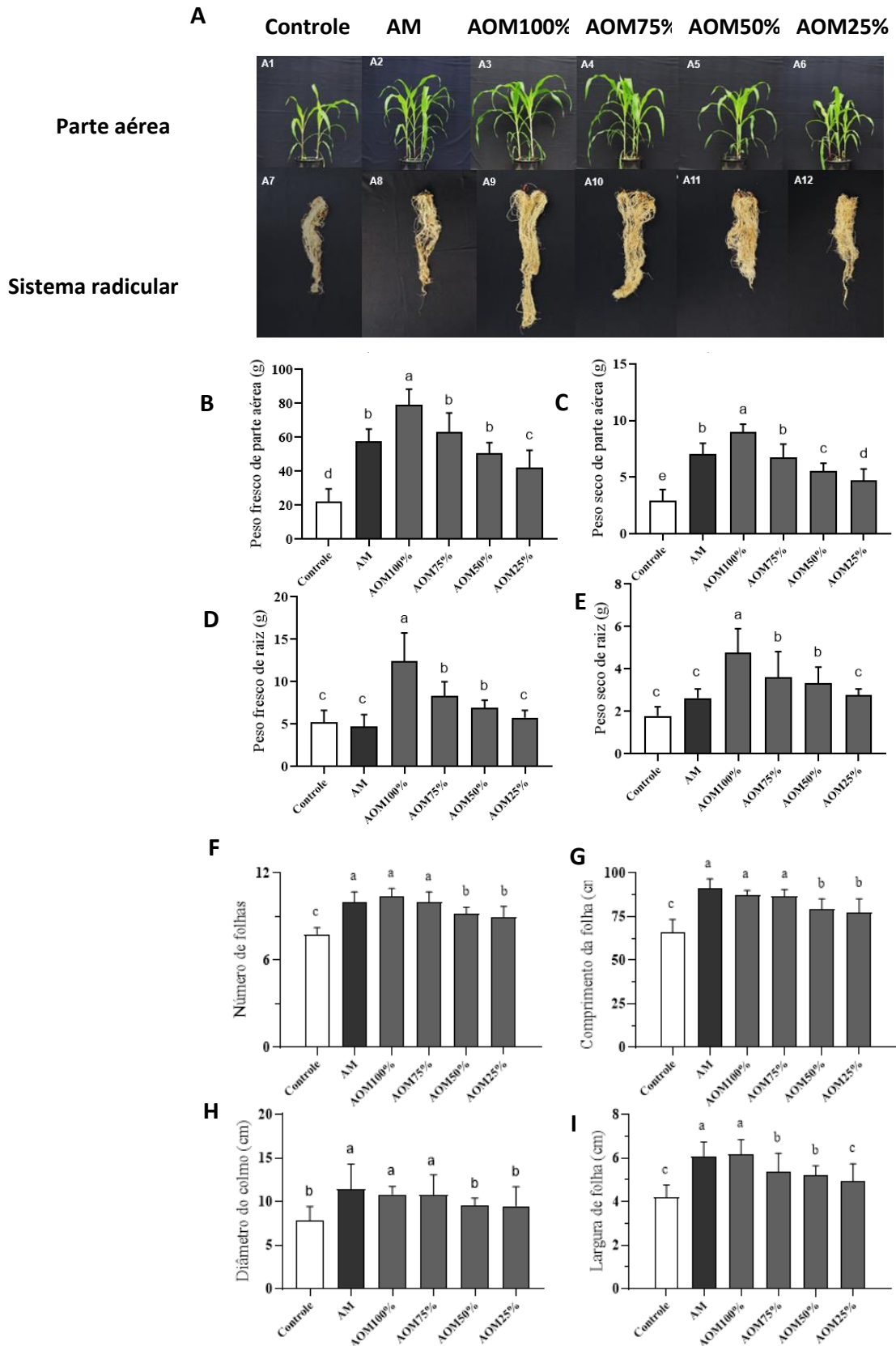


Figura 14: Análises morfológicas das plantas de milho aos 45 dias em resposta às diferentes proporções entre composto orgânico e fertilizantes minerais. A) Morfologia da parte aérea (A1-A6) e sistema radicular (A7-A12) das plantas expostas aos tratamentos. B) Gráfico do peso fresco da parte aérea. C) Gráfico do peso seco da parte aérea. D) Gráfico do peso fresco de raiz. E) Gráfico do peso seco de raiz. F) Gráfico do número de folhas (F). G) Gráfico do comprimento da folha. H) Gráfico do diâmetro do colmo. I) Gráfico da largura de folha. As letras nas barras dos gráficos indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

5.3 Efeito do composto orgânico com diferentes proporções de fertilizantes minerais na fisiologia vegetal de plantas de milho

Após 45 dias de cultivo, as plantas foram avaliadas quanto aos parâmetros fisiológicos por meio da avaliação de pigmentos foliares, eficiência do uso da luz, estresse da planta pela senescência e conteúdo de água foliar. Os dados são apresentados na Figura 16.

Conforme apresentado na Figura 16A, as análises do índice SPAD das plantas revelaram que o tratamento AM, promoveu acréscimo de 54% de intensidade de verde, em comparação às plantas controle (onde não foram adicionados fertilizantes). Nas plantas que receberam o tratamento AOM100%, observou-se um ganho de 44% em comparação ao tratamento controle. Os resultados do tratamento AOM100% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. Os tratamentos AOM75%, AOM50% e AOM25%, geraram ganhos de 26%, 14% e 11%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle.

As análises de antocianinas pelo índice ARI das plantas (Figura 16B) revelaram que o tratamento AM, promoveu acréscimo de 32%, em comparação às plantas controle. Nas plantas que receberam o tratamento AOM100%, observou-se um ganho de 16% em comparação ao tratamento controle. Os tratamentos AOM75% e AOM50%, geraram ganhos de 21% e 17% respectivamente, em comparação ao tratamento controle. Os resultados do tratamento AOM100%, AOM75% e AOM50%, não diferiram estatisticamente do tratamento AM. O tratamento AOM25% promoveu redução de 7% em relação ao tratamento controle, não diferindo estatisticamente do mesmo.

As análises de carotenoides pelo índice CRI das plantas (Figura 16C) indicaram que o tratamento AM, promoveu uma redução de 33%, em comparação às plantas controle. Nas plantas que receberam o tratamento AOM100%, observou-se uma redução de 24% em comparação ao tratamento controle. O tratamento AOM75% promoveu uma redução de 10% em relação ao controle. Os resultados do tratamento AOM100% e AOM75% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. Os tratamentos AOM50% e AOM25%, geraram ganhos de 1% e 14%, respectivamente, em comparação ao tratamento controle.

As análises de flavonoides pelo índice FRI das plantas (Figura 16D) mostraram que o tratamento AM, promoveu uma redução de 26%, em comparação às plantas controle. Nas plantas que receberam o tratamento AOM100%, observou-se uma redução de 22% em comparação ao tratamento controle. O tratamento AOM75% promoveu uma redução de 15% em comparação às plantas controle. Os resultados do tratamento AOM100% e AOM75% não diferiram estatisticamente do tratamento AM. Os tratamentos AOM50% e AOM25%, geraram redução de 0,3% e 9%, respectivamente, não diferindo estatisticamente do tratamento controle.

Adicionalmente, para as avaliações da eficiência do uso da luz pelo índice SIPI (Figura 16E), do estresse da planta pela senescência pelo índice PSRI (Figura 16F) e do conteúdo de água foliar pelo índice WBI (Figura 16G), não houve diferença significativa entre os tratamentos e o controle.

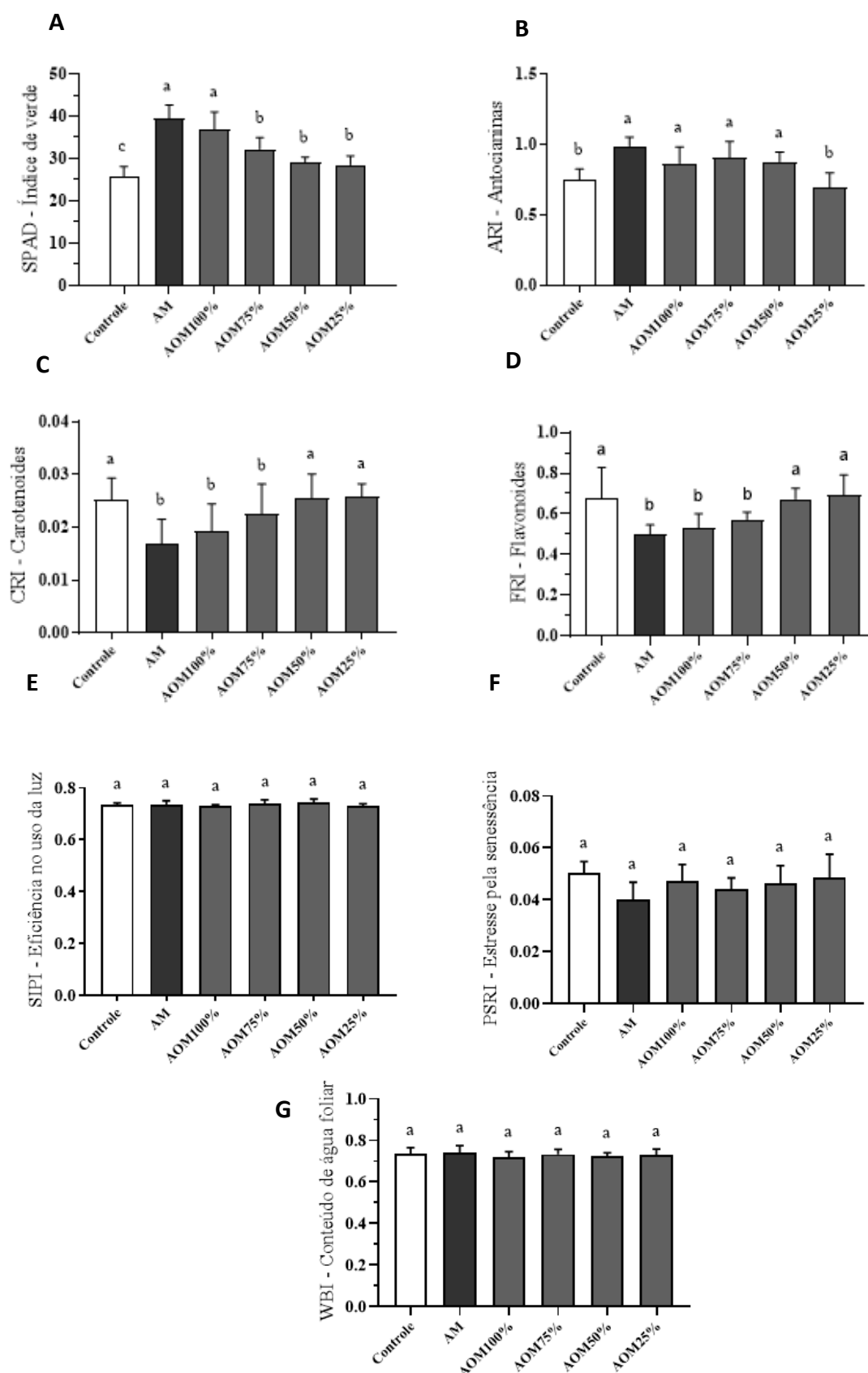


Figura 15: Análises fisiológicas das plantas de milho aos 45 dias em resposta às diferentes proporções entre composto orgânico e fertilizantes minerais. A) Gráfico do índice de verde. B) Gráfico de antocianinas. C) Gráfico de carotenoides. D) Gráfico de flavonoides. E) Gráfico da eficiência do uso da luz. F) Gráfico do estresse da planta pela senescência. G) Gráfico do conteúdo de água foliar. As letras nas barras dos gráficos indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade.

6 DISCUSSÃO

O presente trabalho objetivou estudar os efeitos nutricionais do composto orgânico de ETE no desenvolvimento de plantas de milho (*Zea mays L.*). Para tanto, tal composto foi produzido a partir do lodo de esgoto e cavaco de madeira por meio da compostagem, tendo sua qualidade analisada quanto a segurança microbiológica, teores de metais tóxicos e de nutrientes. Os efeitos da aplicação do composto orgânico de ETE, em combinação com diferentes doses complementares de fertilizantes minerais, foram avaliados em plantas de milho, cultivadas durante 45 dias, em casa de vegetação.

O lodo de esgoto do Município de Campos dos Goytacazes, estado do Rio de Janeiro, Brasil, recebe o tratamento de desidratação por centrífuga seguido de leito de secagem ao ar livre entre 20 e 30 dias. Porém, esse tratamento de desidratação não é suficiente para a eliminação de microrganismos patogênicos, sendo necessário um tratamento complementar de higienização. Neste trabalho, foi aplicada a técnica de compostagem para higienização do lodo de esgoto.

No processo de compostagem do presente estudo, foi realizado a mistura de 1 volume de lodo de esgoto centrifugado para 2 volumes de cavaco de madeira. Aos 180 dias na etapa de maturação da compostagem, os resultados do potencial agronômico encontrados nos macronutrientes foram: N (1,64%), P (0,53%), K (0,04%), Ca (1,16%), Mg (0,24%). Nos micronutrientes foram: Fe (14.930,0 mg/kg), Cu (113,0 mg/kg), Mn (216,6 mg/kg), Zn (342,1 mg/kg), Ni (37,31 mg/kg). Nos metais tóxicos foram: Pb (27,38 mg/kg), Cd (0,56 mg/kg), Cr (29,02 mg/kg), e Hg (0,23 mg/kg). Nos critérios de qualidade sanitária, foi verificada a ausência para *Salmonella sp.* e 1.487,1 NMP/g para *Escherichia coli*.

Rodríguez-Carretero e colaboradores (2023) utilizaram misturas de palha de arroz e lodo de esgoto em processo de compostagem em escala industrial. O resultado do potencial agronômico encontrado nos nutrientes N (2,52%), P (5,41%), K (0,95%), Ca (7,23%), Mg (0,96), Fe (25.692,0 mg/kg), Zn (626,0 mg/kg) e nos metais tóxicos Pb (34,2 mg/kg), Cd (2,18 mg/kg), Cr (112,0 mg/kg) e Hg (0,85 mg/kg) se mostraram em concentrações superiores ao presente trabalho, porém o teor de metais tóxicos não ultrapassou os valores

limite. Já os resultados dos nutrientes Cu (96,1 mg/kg), Mn (183,0 mg/kg) e Ni (24,5 mg/kg) foram inferiores. A diferença de concentração de nutrientes, metais tóxicos e de microrganismos entre os compostos orgânicos de ETE pode estar relacionada às características do esgoto gerado, ao tipo da tecnologia de tratamento e dosagens químicas nas diferentes ETEs e ao tipo de tratamento do lodo de esgoto (Kim *et al.*, 2017). Os resultados deste estudo indicaram que a compostagem em escala industrial é uma solução viável para a reciclagem e valorização de resíduos. Em adição aos resultados obtidos no presente trabalho, esses dados sugerem que o conteúdo de macro e micronutrientes presentes no composto orgânico apresentam características agronômicas interessantes.

Angeles-de Paz e colaboradores (2023) ao estudar a compostagem de lodo de esgoto e resíduos vegetais de oliveira obtiveram composto orgânico de ETE maturado, teores de macronutrientes de N (2,19%), P (3,46%), K (0,75%), Ca (1,96%), Mg (0,43%) que se mostraram em concentrações superiores ao presente trabalho. Com relação aos patógenos, obtiveram ausência em *Salmonella sp.* e 1.000 NMP/g de *Escherichia coli* que se revelaram similar a qualidade sanitária do presente estudo. Os resultados obtidos demonstram a eficiência da higienização e da redução da quantidade de microrganismos patogênicos originalmente presentes no lodo de esgoto sanitário por meio do processo de compostagem.

Abd Elsalam e colaboradores (2021) estudaram o efeito do uso de composto orgânico de esgoto com suplementação mineral NPK no crescimento de milho e fava. Os autores caracterizaram o composto orgânico e encontraram as concentrações de N (1,76%) e Cu (113,8 mg/kg) similares às concentrações do presente trabalho. Os nutrientes K (0,47%), Ca (1,86%), Mg (0,52%), Zn (3.536,0 mg/kg) e os metais tóxicos Pb (144,8 mg/kg), Cd (12,4 mg/kg) e Cr (37,2,02 mg/kg), obtiveram concentrações superiores. As concentrações dos nutrientes P (0,17%), Fe (7.296,0 mg/kg), Mn (169,6 mg/kg) e Ni (21,2 mg/kg) foram inferiores aos do presente trabalho. Os autores indicaram que houve maiores respostas aos rendimentos de milho e fava quando adicionado o composto orgânico com suplementação mineral NPK. Tal fato corrobora com a hipótese da alteração de performance na produtividade ao fazer a substituição parcial da adubação mineral ao complementar com o composto orgânico.

O lodo de esgoto não pode oferecer risco químico ou microbiológico à saúde humana ou ao meio ambiente, devendo receber um tratamento de higienização antes de ser utilizado em cultivos agrícolas (Wang *et al.*, 2008). Neste trabalho, o resultado quanto à presença de *Escherichia coli* no lodo de ETE antes da compostagem foi de $1,6 \times 10^5$ NMP/g e o resultado quanto à presença de *Salmonella sp.* foi de $1,6 \times 10^3$. Após a compostagem, verificamos a ausência para *Salmonella sp.* e 1.487,1 NMP/g para *Escherichia coli*.

A compostagem pode reduzir a quantidade de patógenos potenciais que representam riscos à segurança dos seres humanos e do meio ambiente (Wang *et al.*, 2020). A presença de coliformes é frequentemente usada como um indicador da qualidade sanitária geral do solo e dos ambientes aquáticos (Hassen *et al.*, 2001), por isso é uma forma de avaliação da eliminação de microrganismos patogênicos na compostagem. Khalil e colaboradores (2011) em um estudo com lodo de esgoto municipal de uma ETE em Alexandria observaram que, no início do processo de compostagem o número médio de *Escherichia coli* foi de $3,0 \times 10^7$ NMP/g e o de *Salmonella sp.* era de $3,3 \times 10^5$, valores mais elevados do que deste trabalho. Ao final do processo de compostagem, Khalil e colaboradores (2011) obtiveram ausência desses microrganismos patogênicos. Nossos resultados mostraram diferenças com tais trabalhos. Em ambos os estudos, o lodo foi compostado aerobiamente por meio de revolvimento periódico das leiras e atingiram a temperatura de compostagem termofílica entre 40 e 70°C. A eliminação ou inativação de microrganismos patogênicos em composto orgânico de ETE depende das condições de tempo, umidade e temperatura mantidas durante a compostagem (Rihani *et al.* 2010). Possivelmente, no presente trabalho, a perda da umidade na fase termofílica que ocasionou o decréscimo da curva da temperatura, podendo ter impactado na eliminação dos coliformes. No entanto, mesmo com a remanescência de 1.487,1 de *Escherichia coli*, tal valor é muito inferior ao limite máximo estabelecido pela legislação que é de $1,0 \times 10^6$ pela resolução CONAMA nº 498/2020 para Classe B.

Os metais tóxicos são de grande preocupação na reciclagem agrícola de lodo de esgoto, são mais biodisponíveis para absorção pelas plantas em níveis de pH mais baixos (Singh *et al.* 2011). No presente trabalho, o pH do composto orgânico de ETE ficou na faixa neutra (6,65). Portanto, o pH não induziria a liberação de metais. A matéria orgânica também tem um papel crucial na

proteção das plantas e do meio ambiente contra os metais (Kwiatkowska-Malina 2017) devido a sua alta capacidade de troca catiônica, e a capacidade de formar compostos simples com metais (Kinniburgh *et al.*, 1999).

O lodo analisado neste estudo apresentou teores de metais tóxicos abaixo do limite de tolerância da legislação brasileira resolução CONAMA nº 498/2020. Monitorar a concentração de metais é crucial para garantir que a aplicação de bio sólidos em solos agrícolas seja segura, pois metais tóxicos podem causar danos ao metabolismo humano, contribuindo para a morbidade e mortalidade (Rai *et al.*, 2019). Pineda e colaboradores (2022) analisaram lodos de esgoto domésticos de ETEs no sul do México. Os resultados mostraram que os teores para metais tóxicos estavam abaixo do limite de tolerância da legislação do México que é similar à legislação brasileira. Tiruneh *et al.* (2014) analisaram a composição química do lodo de esgoto de sete estações de tratamento na Suíça e encontraram maiores concentrações de metais tóxicos em lodos provenientes de esgotos industriais. Como o lodo deste estudo foi proveniente de estações que receberam somente esgoto doméstico, os baixos teores de metais tóxicos são justificados. As diferenças na composição do lodo de esgoto dependem da origem do esgoto sanitário desde pequenas cidades a grandes metrópoles e se há contribuição de esgoto industrial no efluente doméstico (Kim *et al.*, 2017).

As concentrações de microrganismos patogênicos e metais tóxicos verificadas no composto orgânico produzido, atenderam à legislação para uso agrícola. A classificação do composto de acordo com a resolução CONAMA nº 498/2020 foi Classe B, sendo permitida sua aplicação em pastagens, forrageiras, árvores frutíferas e culturas importantes como milho, soja, feijão, trigo e café. Composto classe B têm sua aplicação proibida em lavouras cuja parte comestível da planta esteja em contato direto com o solo, como no cultivo de raízes, tubérculos e hortaliças (BRASIL, 2020).

Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) são os três principais macronutrientes essenciais para o desenvolvimento de qualquer cultura agrícola. Ao comparar os macronutrientes NPK presentes no lodo de esgoto deste trabalho, antes de ser higienizado, com o composto orgânico final, percebemos que não houve alteração nos teores de K (0,04%), porém houve diminuição dos teores de N (3,41% para 1,64%) e P (1,56% para 0,53%), o que pode ser

explicado pela combinação de dois fatores: diluição das quantidades de N e P pela mistura com o material estruturante cavaco de madeira, que possui elevada relação C/N (Rowell *et al.*, 2001) e volatilização de parte do N amoniacal devido às altas temperaturas na fase termofílica da compostagem (Khalil *et al.*, 2011).

O nitrogênio é considerado elemento essencial para as plantas, pois está presente na composição das mais importantes biomoléculas, tais como clorofila, proteínas e enzimas (Mifflin; Lea, 1976; Marengo; Lopes, 2011). Os fertilizantes minerais se apresentam na forma solúvel. Sendo assim, os nutrientes fornecidos são facilmente absorvidos pelas plantas. Quando se utiliza fertilizantes minerais na agricultura, menos de 50% do nitrogênio aplicado é utilizado pelas culturas, sendo o restante perdido pela volatilização da amônia, pela lixiviação do nitrato e pela conversão do nitrato em nitrogênio gasoso e perdido para a atmosfera (Anghinoni, 1986; Marengo; Lopes, 2011). A vantagem do uso de composto orgânico de ETE complementado por fertilizantes minerais (adubação organomineral) é por ser rico em nitrogênio orgânico. Portanto, tal forma de nitrogênio está menos disponível às perdas por evaporação e lixiviação, sendo absorvido pelas plantas após sua mineralização em amônio ou nitrato (Weil; Brady, 2017).

O fósforo é um dos nutrientes mais relevantes para o crescimento e ao desenvolvimento das plantas por estar envolvidos em processo metabólicos, como transferência de energia, transdução de sinal, biossíntese de macromoléculas, processos fotossintéticos e respiração (Bouras *et al.*, 2021). Portanto, o fósforo é considerado um recurso crucial na produção de alimentos (Santos *et al.*, 2021). O P presente nos fertilizantes minerais apresenta baixa disponibilidade para as plantas, sendo fortemente absorvido por solos argilominerais e requerendo aplicação de grandes quantidades de fertilizantes fosfatados (Andrade *et al.*, 2010). Devido à diminuição da quantidade das fontes de rochas fosfáticas de alta qualidade, a estimativa é que as reservas de P no mundo durem apenas 50 a 100 anos e o custo de aquisição do fósforo se torne cada vez maiores. Dessa forma, a reciclagem de lodo de esgoto, para reaproveitamento de P, é uma estratégia de relevância ambiental e econômica (Martínez *et al.*, 2014).

Depois dos nutrientes nitrogênio e fósforo, o potássio é o nutriente cuja restrição mais limita o crescimento das plantas (Ketterings *et al.*, 2008). O

composto orgânico de ETE do presente trabalho apresentou baixos teores de K. O nutriente K é encontrado em menor concentração no lodo seco de esgoto por ser uma substância altamente solúvel, sendo diluído e solubilizado no efluente (Berton; Nogueia, 2010). A maior parte deste elemento se encontra na forma mineral, estando prontamente disponível para as plantas (Deschamps; Favaretto, 1999). O uso exclusivo de composto orgânico de ETE pode levar a deficiência de alguns nutrientes. No caso do potássio, este tende a diminuir no solo, afetando o crescimento das plantas (Zuba-Junio *et al.*, 2012). Dessa forma, o K é o elemento de maior necessidade de complementação com fertilizantes minerais quando se utiliza tal composto orgânico na agricultura (Nascimento *et al.*, 2004).

A adubação mineral supre a deficiência de nutrientes do solo e potencializa o desenvolvimento das culturas vegetais (Chandini *et al.*, 2019). Porém pode causar impactos negativos no solo, na água subterrânea e na saúde humana (Chagnon *et al.* 2014). Como alternativa, pode ser utilizada a adubação organomineral a partir da reciclagem dos nutrientes presentes no composto orgânico de ETE (Kawalekar, 2013) complementada com a adubação mineral, visando uma agricultura mais sustentável (Antonkiewicz *et al.*, 2019).

No presente trabalho o efeito de diferentes proporções do composto orgânico e fertilizantes minerais sobre o desenvolvimento de plantas de milho foi analisado por meio das avaliações do crescimento e da fisiologia vegetal. Após 45 dias de cultivo, as plantas foram analisadas quanto aos parâmetros de peso fresco e seco de parte aérea e raiz; bem como através de análises de contagem do número de folhas e medição do comprimento da folha, diâmetro do colmo e largura da folha.

Para as avaliações do número de folhas, comprimento da folha e diâmetro do colmo, pode ser observado que a substituição de parte da nutrição mineral pelos nutrientes presentes no composto orgânico (5 t/há) tratamento AOM100%, não prejudicou o desenvolvimento vegetal, fornecendo dados similares ao tratamento com adubação mineral convencional (tratamento AM). O tratamento AOM75%, onde o composto orgânico (5 t/ha) foi complementado com apenas 75% da adubação mineral utilizada no tratamento AOM100%, também forneceu resultados similares a adubação mineral convencional. Já para as

avaliações de largura de folha, somente o tratamento AOM100% não diferiu do AM.

Nossos ensaios também demonstraram que as plantas do tratamento AOM100%, AOM75%, AOM50% e AOM25% tiveram raízes mais longas e densas, que as plantas que não receberam composto orgânico (AM e Controle). Portanto, a presença do composto orgânico de ETE na formulação organomineral apresentaram forte desenvolvimento radicular. A arquitetura do sistema radicular é fundamental para a assimilação de nutrientes (Smith; De Smet, 2012). A presença da matéria orgânica no solo atua na formação de agregados estáveis e na melhoria da solubilidade dos elementos que afeta positivamente o desenvolvimento do sistema radicular (Nardi *et al.*, 2021). A ação dos ácidos húmicos aumenta o acúmulo de auxinas nas raízes o que resulta no alongamento da raiz e no desenvolvimento de raízes laterais e pelos radiculares (Canellas *et al.*, 2002). Os grupos fenólicos e carboxila presentes na estrutura dos ácidos húmicos, aceleram o processo de desenvolvimento das raízes (Bento *et al.*, 2020).

Os ácidos húmicos gerados a partir da decomposição da matéria orgânica têm importante função nos processos de regulação dos ecossistemas, é reservatório de carbono e nitrogênio, participa do controle de pH e da formação da estrutura do solo (Oertel *et al.*, 2016). Em milho, foi demonstrado que o ácido húmico reduz impactos negativos da escassez de água e aumenta a sobrevivência da planta ao estresse hídrico (Moghadam *et al.*, 2014).

A massiva utilização de fertilizantes minerais não contribui para a sustentabilidade da agricultura (Ochal; Smreczak, 2020). O interesse em técnicas de agricultura ecológica, sustentável e orgânica tem aumentando recentemente (Esitken *et al.*, 2005). O processo de compostagem de resíduos orgânicos, como lodo de esgoto, apresenta uma fonte de ácidos húmicos além de reciclar nutrientes (Xu; Geelen, 2018).

Observamos neste trabalho que a matéria orgânica do composto orgânico de ETE utilizada na formulação organomineral tem efeito positivo para a cultura de milho, podendo atuar na retenção dos nutrientes ao agregar partículas minerais no solo e reduzir as perdas desses nutrientes por lixiviação (Siebielec *et al.*, 2020). Assim, o composto orgânico proporciona efeito promotor de crescimento radicular que potencializa a acessibilidade da planta aos

nutrientes e água. Jindo e colaboradores (2012) demonstraram que as substâncias húmicas de resíduos orgânicos urbanos são promotores de crescimento das plantas. O aumento na bioatividade devido a compostagem está relacionado às transformações químicas durante o processo quando é gerada forte hidrofobicidade.

As análises dos efeitos sobre o crescimento e desenvolvimento da planta revelaram ganho de peso fresco de parte aérea e também no peso fresco e seco de raiz para as plantas que receberam valores superiores a 50% da complementação de fertilizantes minerais ao composto orgânico de ETE. Abaixo desses valores, houve redução do desenvolvimento. Para peso seco de parte aérea, houve ganho do desenvolvimento para as plantas que receberam valores superiores a 75% da complementação, em comparação às plantas que receberam apenas adubação mineral.

O tratamento AOM100%, onde se utilizou o equivalente a 5 t/ha de composto orgânico, complementados com fertilizantes minerais suficientes para equivaler ao total de NPK oferecido no tratamento AM, houve um incremento de 41,68% na biomassa das plantas. O tratamento AOM75%, onde se utilizou o equivalente a 5 t/ha de composto orgânico complementados com 75% dos fertilizantes minerais oferecidos no tratamento AOM100%, gerou ganho de 6,99% e o tratamento AOM50% ficou inferior a 8,35% em comparação ao tratamento com adubação mineral (AM). O fornecimento de matéria orgânica traz importantes ganhos para o crescimento da planta, em adição ao seu papel como fonte de N, P e K (Barbosa; Filho, 2006). Além disso podemos observar que mesmo utilizando metade da complementação mineral na formulação organomineral (AOM50%), obtivemos resultados semelhantes ao AM, sugerindo então que uma formulação organomineral pode resultar em redução dos gastos com fertilizantes minerais.

Os níveis elevados de matéria orgânica do solo resultam na melhoria das propriedades físicas (retenção de água), químicas (propriedades tampão e migração de elementos) e biológicas (fornecimento de nutrientes para microrganismos) do solo (Xin *et al.*, 2016). No sentido oposto, a redução da matéria orgânica do solo compromete as funções e a qualidade do solo (Tsozué *et al.*, 2021). Os processos de mineralização da matéria orgânica são intensificados pelos fenômenos como alterações climáticas e déficits

pluviométricos que tornam o solo vulnerável à perda de carbono (Siebielec *et al.*, 2020).

Nossos ensaios de peso seco revelaram que o aumento de biomassa na cultura de milho pelo tratamento AOM100% foi de 41,68% comparado a adubação mineral (Tratamento AM). Abd Elsalam e colaboradores (2021) observaram que as plantas tratadas com composto de lodo de esgoto complementado por NPK tiveram um desempenho significativo melhor do que as plantas tratadas apenas com adubação mineral, o incremento de biomassa foi de 33,66% comparados a adubação mineral. Os autores concluíram que os efeitos benéficos da aplicação de composto orgânico de ETE a um solo cultivado com milho, além de promover maior crescimento e biomassa do milho, incluem um aumento drástico no rendimento de grãos.

Neste trabalho o aumento dos níveis de coloração verde (SPAD) do tratamento AOM100% foi de 44% comparado ao controle. A análise de SPAD é utilizada para verificar a eficiência da aplicação de composto orgânico de ETE no incremento de clorofila e índice de verde na cultura de milho. O índice SPAD é uma variável que apresenta alta correlação com o teor de clorofila, eficaz para estimar a quantidade de N assimilada pelas plantas ao longo do desenvolvimento da cultura (Xiong *et al.*, 2015). Behrouzi e colaboradores (2022) avaliaram a qualidade de milho sob vários regimes de adubação em um experimento realizado no Irã, o resultado obtido foi um incremento de SPAD em 46,6% com aplicação de composto orgânico de ETE complementado com fertilizantes minerais, comparado ao controle. Portanto os nossos resultados se mostraram em sintonia com tais achados, mostrando índice apropriado de verde na cultura de milho com a aplicação de composto orgânico de ETE complementado por fertilizantes minerais.

O metabolismo primário e secundário de plantas é afetado por diversos fatores externos, sendo a disponibilidade de nutrientes um desses fatores (Biasi *et al.*, 2009). Plantas deficientes em nitrogênio apresentam-se amareladas e com crescimento reduzido, têm seu ciclo encurtado e com clorose nas folhas mais velhas (Marenco e Lopes, 2011). As folhas das plantas são responsáveis pela fotossíntese, e também pela produção de metabólitos secundários, onde o grupo dos flavonóides é considerado um dos maiores, sendo eles pigmentos naturais

importantes, cuja função principal é proteger as plantas contra agentes oxidantes (Silva *et al.*, 2015).

Segundo Kandil *et al.* (2004) as plantas que estão sob algum tipo de estresse tendem a aumentar a produção e o acúmulo de flavonoides em seus tecidos. Observando os resultados de SPAD e flavonoides desde trabalho, os valores foram respectivamente de 36,9 e 0,53 no tratamento AOM100%. Sales e colaboradores (2018) analisaram a influência de diferentes resíduos orgânicos em componentes fisiológicos de folhas da espécie aroeira-vermelha. O composto orgânico proveniente do lodo de esgoto forneceu resultado para SPAD de 43,4 e flavonoides de 0,50. Os nossos resultados mostraram que os teores de compostos fenólicos produzidos pelas plantas são menores em condições de alto suprimento de nitrogênio (Haukioja *et al.*, 1998), corroborando com os índices de nitrogênio pelo SPAD que são inversamente proporcionais aos teores de flavonoides.

Nossos resultados mostraram diferença no acúmulo de antocianina entre os tratamentos, apresentando maiores médias nos tratamentos AM, AOM100%, AOM75% e AOM50%. As antocianinas são corantes pertencentes à família de flavonóides, amplamente distribuídos entre flores, frutas, baías e legumes, e são responsáveis pela cor brilhante, como azul, vermelho e roxo. Também possuem efeitos terapêuticos positivos, principalmente associados à sua capacidade antioxidante (Hwang *et al.*, 2011). Os nutrientes primários (NPK) necessários para o cultivo de milho, tem diferentes funções como interferir na fotossíntese, ativar enzimas e formar proteínas e aminoácidos. Embora, interfiram na biossíntese dos pigmentos (flavonoides e carotenoides), para formar aminoácidos primários, desencadeiam diferentes tipos de reações enzimáticas que dão origem a três antocianinas básicas (Association, 2000; Irani *et al.*, 2003). Portanto os tratamentos AM, AOM100%, AOM75% e AOM50% favoreceram o aumento dos teores de antocianinas, potencialmente elevando a atividade antioxidante da planta (Martínes-Ballesta *et al.*, 2010).

Os resultados deste trabalho mostraram baixas concentrações de carotenoides de todos os tratamentos. Segundo Taiz e Zeiger (2017), os pigmentos fotossintéticos são responsáveis pela tonalidade verde nas plantas, onde as clorofilas a e b, refletem o verde intenso e o verde-amarelado, respectivamente, e os carotenoides que incluem os carotenos e xantofilas, cor

laranja e amarela. Dessa forma, esses três componentes juntos, representam expressiva função nas taxas fotossintéticas das plantas. Enquanto as clorofilas capturam a luz solar e fazem a conversão da radiação luminosa em energia química na forma de ATP e NADPH (Daniel et al. 2016), os carotenoides (chamados pigmentos acessórios) são capazes de dissipar o excesso de energia (Taiz e Zeiger, 2017). Normalmente, encontram-se maiores concentrações de carotenoides quando as plantas estão expostas a altos níveis de luminosidades (Siebeneichler *et al.*, 2008), o que não foi observado neste trabalho, visto que as plantas dentro da casa de vegetação receberam baixa incidência de luz solar.

Nas avaliações dos pigmentos foliares pode ser observado que o tratamento AOM100% e AOM75% geraram incremento de clorofila, menores concentrações de flavonoides e carotenoides e maiores concentrações de antocianinas em relação ao controle. Já o tratamento AOM50% teve incremento de clorofila e maiores concentrações de antocianinas, porém as concentrações de carotenoides e flavonoides tiveram valores similares ao controle.

Tanto os pigmentos fotossintéticos como os metabólitos secundários da planta são influenciados pelo fornecimento de fertilizantes orgânicos, visto que esses materiais fornecem nutrientes e matéria orgânica para a planta (Pereira, 2015). Os resultados fisiológicos deste trabalho demonstram que as plantas de todos os tratamentos não indicaram estado de estresse. Além das baixas concentrações de metabólitos secundários, outros parâmetros como eficiência no uso da luz, estresse pela senescência e conteúdo de água foliar não apresentarem diferenças significativas.

O composto orgânico de ETE analisado neste trabalho é uma fonte de matéria orgânica e nutrientes para as plantas, pois apresenta quantidades relevantes de nitrogênio e fósforo entre outros macronutrientes e micronutrientes. Porém, a quantidade dos nutrientes presentes no lodo pode não atender a quantidade exigida pelas culturas, sendo necessário a complementação com a aplicação de fertilizantes minerais, conforme também foi avaliado pelos autores Giovannetti de Macedo *et al.* (2014) e Nikzad *et al.* (2015).

O fertilizante organomineral é balanceado para suprir as exigências nutricionais para o desenvolvimento da cultura (Lozada *et al.*, 2015). Tal abordagem contribui para a qualidade dos solos agrícolas, reduz custos, aumenta a produção de alimentos, recicla nutrientes e atenua a disposição de

resíduos em aterros sanitários com redução de dano ambiental (Ouimet *et al.*, 2015). Nossos dados evidenciaram que a formulação organomineral permite uma redução da demanda por fertilizante mineral adicionado ao composto orgânico de ETE, possivelmente associada a maior eficiência no fornecimento de nutrientes às plantas e a redução de perdas por lixiviação e evaporação (Antonkiewicz *et al.*, 2019).

O composto orgânico de ETE é fonte de matéria prima para húmus do solo (Rusănescu *et al.*, 2022). O teor de matéria orgânica, aumenta a capacidade tampão do solo, pois reduz a acidez ao formar amônia, e aumenta a quantidade de cálcio trocável (Rusănescu *et al.*, 2022). Isso melhora as propriedades do solo, além da estrutura, permeabilidade, aeração, erosão e capacidade de retenção de água (Bargezar *et al.*, 2002). A aplicação combinada de fertilizantes minerais e materiais orgânicos é uma alternativa que permite a redução da acidificação do solo e incremento do teor de matéria orgânica (Islam *et al.*, 2021).

A formulação organomineral associada ao aproveitamento do lodo de esgoto, propicia a economia circular, permitindo a recuperação dos nutrientes (Antonkiewicz *et al.*, 2019). Os teores presentes de matéria orgânica podem fornecer substrato para o processo de humificação resultando na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos (Xin *et al.*, 2016). Esta abordagem também é justificada pelo aumento da capacidade tampão e de sorção do solo (Rusănescu *et al.*, 2022). O aumento da capacidade tampão reduz as flutuações no pH do solo, enquanto o aumento da capacidade de sorção, devido ao alto teor de substâncias húmicas, reduz as perdas de nutrientes e a disponibilidade de íons de metais tóxicos (Siebielec *et al.*, 2020). Atuando como promotor de crescimento das plantas.

Portanto, os dados obtidos neste trabalho confirmam a promoção do crescimento radicular e incremento de biomassa de plantas de milho pela aplicação de composto orgânico de ETE suplementado por fertilizantes minerais. As formulações organominerais AOM100%, AOM75% e AOM50% sugerem que a promoção do crescimento radicular e o ganho de biomassa é obtida, principalmente pela ação da matéria orgânica e dos macronutrientes e micronutrientes presentes no composto orgânico que condicionam o solo, melhoram a retenção de água e potencializa a acessibilidade da planta aos nutrientes. Os resultados deste trabalho contribuem para a compreensão dos

efeitos da adubação organomineral para a promoção do crescimento radicular e ganho em biomassa, adicionalmente, respaldam futuros estudos visando a utilização de fertilizantes orgânicos proveniente do lodo de esgoto na agricultura como uma alternativa sustentável para amenizar os impactos ambientais dos resíduos do saneamento básico e dos fertilizantes minerais, promovendo a economia circular.

O aproveitamento do lodo de esgoto na agricultura crescerá nos próximos anos, essencialmente devido aos avanços da legislação aplicável e ao aumento da sua geração dado pela melhoria dos índices de saneamento básico. O conhecimento das suas potencialidades, por parte dos agricultores, certamente trará benefícios à agricultura e à economia circular, e será uma alternativa importante à gestão dos resíduos gerados nos centros urbanos.

7 CONCLUSÕES

O processo de compostagem desenvolvido neste trabalho foi eficaz na inertização do lodo de estação de tratamento de esgoto, gerando um produto seguro e de qualidade.

O composto orgânico produzido apresentou boa qualidade, sendo classificado como Classe B de acordo com a Resolução CONAMA nº 498/2020, pois não ultrapassou o valor limite para o teor de metais tóxicos e dos microrganismos patogênicos.

A utilização do composto orgânico produzido, em formulações organominerais, se mostrou efetiva para a adubação da cultura do milho. Adicionalmente, observou-se um efeito positivo da combinação entre composto orgânico e fertilizante mineral, onde uma concentração menor de nutrientes minerais pode ser utilizada, indicando potencial redução de custos para a adubação da cultura.

Nossas análises foram conduzidas apenas até os 45 dias de cultivo das plantas. Portanto, futuros ensaios de cultivo da planta em ambientes até o fechamento do ciclo, podem trazer interessantes descobertas quanto a produtividade de grãos e outras características que não foram exploradas. Adicionalmente, a avaliação de efeitos do composto orgânico em plantas cultivadas sob condições de estresse hídrico permitirá avaliar se o incremento do sistema radicular pode elevar a resistência da lavoura à seca.

8 PERSPECTIVAS

O trabalho poderá ter continuidade na com o plantio de milho em campos de produção (fazendas) visando a determinação dos indicadores de produtividade como, índice de colheita, peso, comprimento e diâmetro da espiga e peso de mil grãos. Além disso, análises de monitoramento do solo também poderão ser realizadas para avaliar o potencial do composto orgânico de ETE como um condicionador de solo por anos de aplicação.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abd Elsalam, H. E., El-Sharnouby, M. E., Mohamed, A. E., Raafat, B. M., El-Gamal, E. H (2021). Effect of Sewage Sludge Compost Usage on Corn and Faba Bean Growth, Carbon and Nitrogen Forms in Plants and Soil. *Agronomy* 2021, 11, 628. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040628>.
- Abdel-Raouf, N., Al-Homaidan, A.A. and Ibrahim, I.B.M. (2012). Agricultural importance of algae. *Afr J Biotechnol* 11:11648–11658.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). NBR 10.004: Resíduos sólidos – Classificação, Rio de Janeiro, RJ, 71p.
- Abreu-Junior, C. H. *et al.* (2019). Effects of sewage sludge application on unfertile tropical soils evaluated by multiple approaches: A field experiment in a commercial Eucalyptus plantation. *Science of the Total Environment*, 655(1):1457-146.
- Agrolink Notícias. (2022). Gasto médio com fertilizantes dobrou em um ano. https://www.agrolink.com.br/noticias/gasto-medio-com-fertilizantes-dobrou-em-um-ano_465534.html. Acesso em: 19 jun. 2022.
- Alavi, N., Daneshpajou, M., Shirmardi, M., Goudarzi, G., Neisi, A., ; Babaei, A. A. (2017). Investigating the efficiency of co-composting and vermicomposting of vinasse with the mixture of cow manure wastes, bagasse, and natural zeolite. *Waste Management*, 69, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.039>
- Alvarenga, P., Farto, M., Mourinha, C., ; Palma, P. (2016). Beneficial Use of Dewatered and Composted Sewage Sludge as Soil Amendments: Behaviour of Metals in Soils and Their Uptake by Plants. *Waste and Biomass Valorization*, 7(5), 1189–1201. <https://doi.org/10.1007/S12649-016-9519-Z>
- Alvarenga, P., Mourinha, C., Farto, M., Santos, T., Palma, P., Sengo, J., Morais, M.-C., ; Cunha-Queda, C. (2015). Sewage sludge, compost and other representative organic wastes as agricultural soil amendments: Benefits versus limiting factors. *Waste Management*, 40, 44–52. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.01.027>.
- ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos (2021). Mercado de fertilizantes no Brasil. Elaboração DPE/SAE.
- Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2022/03/plano-nacional-de-fertilizantes-brasil-2050.pdf> Acesso em: 20 mar. 2023.
- Andrade, C. A., Boeira, R. C., Pires, A. M. M. (2010). Nitrogênio presente em lodo de esgoto e a resolução nº 375 do CONAMA. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. (Org.). *Uso agrícola de lodo de*

esgoto: avaliação após resolução nº 375 do CONAMA. Botucatu: FEPAF, p. 157-170.

Andreoli, C. V., Texeira Pinto, M. A. (2001). Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final. ABES.

Andreoli, C. V., Von Sperling, M., Fernandes, F. (2001). Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG; Curitiba: Companhia de Saneamento do Paraná. v. 6.

Andreoli, C. V., Ferreira, A.C., Chernicharo, C.A. (2003). Secagem e higienização de lodos com aproveitamento do biogás, cap. 05. In: Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás. PROSAB 3. Vitória-ES, p.130 -133.

Angeles-de Paz, G., León-Morcillo, R., Guzmán, S., Robledo-Mahón, T., Pozo C., Calvo, C., Aranda, E. (2023). Pharmaceutical active compounds in sewage sludge: Degradation improvement and conversion into an organic amendment by bioaugmentation-composting processes. Waste Managemente 167-178. Department of Microbiology, University of Granada, Granada, Spain <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.055>

Anghinoni, I. (1986). Adubação nitrogenada nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: SANTANA, M.B.M. Adubação nitrogenada no Brasil Ilhéus: CEPLAC/SBCS. Cap.I. p.1-18.

Antonkiewicz, J. *et al.* (2019). Effect of municipal sewage sludge on soil chemical properties and chemical composition of spring wheat. Ecological Chemistry and Engineering, 26(3):583-595.

APWA – PW - Institute For Solid Wastes Of American Public Works Association. (1970). Municipal refuse disposal public administration service. 3ª ed. Illinois. <http://www.apwa.net/Search?q=composting;page=8>. Acesso em: 10 dez. 2022.

Association, I. F. I. (2000). Fertilizers and their use: a pocket guide for extension officers. [s.l.] Food ; Agriculture Org.

Baczek-Kwinta, R. *et al.*, (2019). Photosynthetic response of cabbage in cadmium-spiked soil. Photosynthetica, 57(3):731-739.

Barber, S.A. (1984). Soil Nutrient Bioavailability, A Mechanistic Approach; John Wiley and Sons: New York, NY, USA.

Barbosa G.M., Filho T. (2006). Agriculture utilization of sewage sludge: effect on the chemical and physical properties of soils and on the productivity and recovery of degraded areas. Ciencias Agrarias (Londrina) 27, 565.

- Bargezar A.R., Yousefi A., Daryashenas A. (2002). The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant and Soil* 247, 295.
- Batstone, D. J., Hülsen, T., Mehta, C. M., ; Keller, J. (2015). Platforms for energy and nutrient recovery from domestic wastewater: A review. *Chemosphere*, 140, 2–11. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2014.10.021>
- Behrouzi, D., Diyanat M., Majidi E., Mirhadi M. J., Shirkhani A. (2022). Yield and quality of forage maize as a function of diverse irrigation regimes and biofertilizer in the west of Iran. *Journal of Plant Nutrition*, v. 46(10):2246-2256. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2155539>
- Benkova, M., Nenova, L., Simeonova, T., Harizanova, M., Atanassova I. (2023). Effect of organic amendments on soil characteristics and maize biomass in a greenhouse experimente. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 29 (No 1) 2023, 55–61.
- Bento, L.R., Melo, C.A., Ferreira, O.P., Moreira, A.B., Mounier, S., Piccolo, A., Spaccini, R., Bisinoti, M.C. (2020). Humic extracts of hydrochar and Amazonian Dark Earth: Molecular characteristics and effects on maize seed germination. *Sci. Total Environ*, 708, 135000.
- Berendes, D., Levy, K., Knee, J., Handzel, T., ; Hill, V. R. (2015). Ascaris and Escherichia coli Inactivation in an Ecological Sanitation System in Port-au-Prince, Haiti. *PLOS ONE*, 10(5), e0125336. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125336>
- Berton, R. S.; Nogueira, T. A. R. (2010). Uso de lodo de esgoto na agricultura. In: COSCIONE, A. R.; NOGUEIRA, T. A. R.; PIRES, A. M. M. *Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a resolução nº 375 do CONAMA*. Botucatu: FEPAF, 2010. cap. 2, p. 31-50.
- Bettiol, W., Camargo, O. A. (2006). *Lodo de Esgoto: Impactos Ambientais na Agricultura*. Embrapa Meio Ambiente.
- Biasi, L. A., Machado, E. M., Kowalski, A. P., Signor, D., Alves, M. A., Lima, F. I.; Deschamps, C., Côcco, L., Scheer, A. P. (2009). Adubação orgânica na produção, rendimento e composição do óleo essencial da alfavaca quimiotipo eugenol. *Horticultura Brasileira*. v.27, n.1, p. 35-39.
- Bielschowsky, M. C. (2014). *Modelo de gerenciamento de lodo de estação de tratamento de esgotos: aplicação do caso da Bacia da Baía de Guanabara*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Bittencourt, S., Aisse, M.M., Serrat, B.M. (2017). Gestão do uso agrícola do lodo de esgoto: estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 22, n. 6, p.1129 – 1139. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522017156260>

- Boeira, R. C., Ligo, M. A. V., Dynia, J. F. (2002). Mineralização de nitrogênio em solo tropical tratado com lodos de esgoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.37, n.4, p.1639-1647.
- Boiago, R. G. F. S. R. *et al.* (2017). Combinação de espaçamento entrelinhas e densidade populacional no aumento da produtividade em milho. *Revista Brasileira de Milho e 46 Sorgo*, v. 16, n. 3, p. 440–448.
- Borba, R. P., Ribeirinho, V. S., de Camargo, O. A., de Andrade, C. A., Kira, C. S., ; Coscione, A. R. (2018). Ion leaching and soil solution acidification in a vadose zone under soil treated with sewage sludge for agriculture. *Chemosphere*, 192, 81–89. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.10.112>
- Bouras, H., Bouaziz, A., Choukr-Allah R., Hirich, A., Devkota, KP., Bouazzama, B. (2021). Phosphorus fertilization enhances productivity of forage corn (*Zea mays* L.) irrigated with saline water. *Plants* 10.
- Bouriou M, Alaoui-Sehmer L, Laffray X, Benbrahim M, Aleya L, Alaoui-Sossé B (2015). Sewage sludge fertilization in larch seedlings: effects on trace metal accumulation and growth performance. *Ecol Eng* 77:216–224. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.01.031>
- Brasil (2004). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Câmara dos Deputados. Brasília. 160 p.
- Brasil (2006). Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº. 375, de 30 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. *Diário Oficial da União: Seção 1*, Brasília, DF, p. 141-146, 2006.
- Brasil (2017). Atlas Esgotos Despoluição De Bacias Hidrográficas. Brasília, p 56.
- Brasil (2010). Lei 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. *Diário Oficial da União*, Brasília, Seção 1, p. 3. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 8 mar. 2023.
- Brasil (2020). Ministério do Meio Ambiente. 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. *Diário Oficial da União: Seção 1*, Brasília, DF, edição 161, p. 265, 2020b.
- Brasil (2020). Lei n. 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Brasília, DF: Presidência da República, 2020a. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 07 mar. 2023.

SNIS (2021). Ministério do Desenvolvimento Regional. Serviço Nacional de Informações de Saneamento. Informações para o planejamento do Esgotamento Sanitário. Diagnostico SNIS-AE 2021. Brasília, DF. Disponível em <https://www.gov.br/mdr/ptbr/assuntos/saneamento/snis/produtosdosnis>. Acesso em: 13 mar.2023

Brasil (2022). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Projeções do agronegócio. Brasil 2020/21 a 2030/31. 12ª edição, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2020-2021-a-2030-2031.pdf/view>. Acesso em 15 mar. 2022.

Budziak, C. R.; Maia, C. M. B. F.; Mangrich, A. S. (2004). Química Nova, 27, 399.

Canellas, L.P., Olivares, F.L., Okorokova-Façanha, A.L., Façanha, A.R. (2002). Humic acids isolated from earthworm compost enhance rootelongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. Plant Physio, 1.

Carbonell, G., Imperial, R. M. de Torrijos, M., Delgado, M., ; Rodriguez, J. A. (2011). Effects of municipal solid waste compost and mineral fertilizer amendments on soil properties and heavy metals distribution in maize plants (Zea mays L.). Chemosphere, 85(10), 1614–1623. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2011.08.025>

Castro H, Gómez M. (2001). Soil fertility and fertilisers. In: Burbano H, Mojica F (Eds.) Soil science. basic principles. Colombian Society of Soil Science, Bogotá, Colombia.

CEPEA - Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. PIB Agro CEPEA-USP/CNA, jan/set (2022). Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>. Acesso em: 09 fev. 2023

Chandini, K. R., Kumar, R., ; Prakash, O. (2019). The impact of chemical fertilizers on our environment and ecosystem. Research trends in environmental sciences, 69-86.

Chagnon, M. *et al.* (2014). Risks of large-scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services. Environ Sci Pollut Res. doi:10.1007/s11356-014-3277-x

Coelho, A.M.; Cruz, J.C; Pereira Filho, I.A. (2003). Rendimento do milho no Brasil: Chegamos ao máximo. Informações Agrônômicas, v. 101, p.1-12.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento safra brasileira

- grãos. Volume onze, segundo levantamento, p. 56. Brasília, novembro (2023). ISSN: 2318-6852.
- Corrêa, R.S.; Fonseca, Y. M. F.; Corrêa, A. S. (2007). Produção de bio sólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 11(4), p.420–426.
- Daniel, E. S., Amarante, C. V. T., Martin, M. S., Mquelluti, D. J., Campos, M. L. (2016). Relação entre o teor absoluto e relativo de clorofila em folhas de vimeiro. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 307-312, jan.-mar. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509821122>.
- Deschamps, C., Favaretto, N. (1997). Projeto interdisciplinar para o desenvolvimento de critérios sanitários, agronômicos e ambientais para a implantação da reciclagem agrícola do lodo de esgoto. Curitiba: SANEPAR, p.56. Relatório Técnico.
- Esitken, A., Ercisli, S., Karlidag, H., Sahin, F. (2005). Potential use of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in organic apricot production. In: Proceedings of the international scientific conference: Environmentally friendly fruit growing, Polli, Estonia, 7-9 September. Tartu University Press; 2005. p. 90–7.
- FAO (2020). Crops and livestock products. Disponível em: <http://www.fao.org>. Acessado em 16 Junho de 2020.
- Fernandes, F.; Andreoli, C. V. (1997). Manual técnico para utilização agrícola do lodo de esgoto no estado do Paraná. Curitiba: SANEPAR, 96p.
- Fernandes, F. ; Silva, S. M. C. P. (2000). Manual prático para a compostagem de bio sólidos (1a). ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- Ferreira, A.C., Andreoli, C.V.; Jürgensen, D. (1999). Produção e características dos bio sólidos. In: Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura. Rio de Janeiro: PROSAB.
- Ferreira, A. S., Camargo, F. A. O., Tedesco, M. J., ; Bissani, C. A. (2003). Alterações de atributos químicos e biológicos de solo e rendimento de milho e soja pela utilização de resíduos de curtume e carbonífero. Revista Brasileira de Ciência Do Solo, 27(4), 755–763. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832003000400020>
- Foley, J., Ramankutty, N., Brauman, K. *et al.* (2011). Solutions for a cultivated planet. Nature 478, 337–342. <https://doi.org/10.1038/nature10452>
- Fumagalli, M. *et al.* (2017). Desempenho produtivo do milho híbrido simples em função de espaçamentos entre fileiras e populações de plantas. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v. 16, n. 3, p. 426–439.

- Galdos, M. v, de Maria, I. C., ; Camargo, O. A. (2004). Atributos químicos e produção de milho em um latossolo vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 28, 567–577.
- Garg, P.; Gupta, A.; Satya, S.; Bioresour. Technol. (2006). 97, 391.
- Gershenzon, J. (1984). Changes in the levels of plant secondary metabolites under water and nutrient stress. Springer.
- Giovannetti de Macedo, F., José de Melo, W., Cristina Souza Merlino, L., Maria de Albuquerque Donha, R., Maurício Peruca de Melo, G., Lavres Junior, J., ; Donato Castellane, P. (2014). Dynamics of zinc (Zn) and nickel (Ni) in a Cerrado Oxisol treated with sewage sludge for a long period. *AJCS*, 8(11), 1487–1494.
- Gitelson, A.A., Zur, Y., Chivkunova, O.B., Merzlyak, M.N. (2002). Assessing Carotenoid Content in Plant Leaves with Reflectance Spectroscopy. *Photochemistry and photobiology*, 75(3), 272-281
- Globalfert (2021). Consumo de fertilizantes por cultura em 2020. Disponível em <https://www.globalfert.com.br/OGFposEvento/arquivo/Outlook-GlobalFert-2021.pdf> Acesso em: 20 mar.2023
- Gobbi, M. A. (2003). Pontencialidade do uso do lodo de esgoto como fonte de macronutrientes no cultivo do milho (*Zea mays* L.) no município de Maringá - PR [Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)]. Faculdade de Ciências Agrônômicas. Universidade Estadual Paulista. Botucatu.
- Gomes, S. B. V. (2004). Utilização de lodo de esgoto como fertilizante para a cultura do milho: efeitos no solo e na planta. Recife: UFRPE, 54p. Dissertação Mestrado
- Gomes, D. R., Caldeira, M. V. W., Delarmelina, W. M., Gonçalves, E. de O., ; Trazzi, P. A. (2013). Lodo de esgoto como substrato para produção de mudas de *Tectona grandis* L. *CERNE*, 19(1), 123–131. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602013000100015>
- Handreck, K. A. (1978). What's wrong with my soil?. Gien Osmond, S.A. CSIRO Division of Soil. <https://doi.org/10.25919/5b8ed637dc531>
- Hashemi, S., Boudaghpour, S., ; Han, M. (2019). Evaluation of different natural additives effects on the composting process of source separated feces in resource-oriented sanitation systems. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 185, 109667. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109667>
- Hassen A, Belguith K, Jedidi N, Cherif A, Cherif M, Boudabous A (2001). Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresour Technol* 80:217–225

- Haug, R. T. (2018). The Practical Handbook of Compost Engineering. In The Practical Handbook of Compost Engineering. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203736234>
- Haukioja, E., Ossipov, V., Koricheva, J., Honkanen, T., Larsson, S., Lempa, K. (1998). Biosynthetic origin of carbon-based secondary compounds: cause of variable responses of woody plants to fertilization?. *Chemoecology*, v. 8, n. 3, p. 133-139.
- Herzel, H., Krüger, O., Hermann, L., ; Adam, C. (2016). Sewage sludge ash — A promising secondary phosphorus source for fertilizer production. *Science of The Total Environment*, 542(Pt B), 1136–1143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.059>
- Huang, P.M.; Li, Y.; Sumner, M.E. (2011). *Resource Management and Environmental Impacts*, 2nd ed.; CRC Press: New York, NY, USA.
- Hwang, Y. P. *et al.* (2011). Purple sweet potato anthocyanins attenuate hepatic lipid accumulation through activating adenosine monophosphate–activated protein kinase in human HepG2 cells and obese mice. *Nutrition Research*, v. 31, n. 12, p. 896–906, dez.
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Agricultura, Pecuária e Pesca. Grupo de Conjuntura da Dimac/IPEA. Publicado set (2022). Disponível em: <http://www.ipea.gov>. Acesso em: 09 fev. 2023
- Inácio O, C. de T.; Miller, P. R. M. (2009). *Compostagem: ciência e prática para a gestão de resíduos orgânicos*. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 156.
- Ingelmo, F., Molina, M. J., Soriano, M. D., Gallardo, A., ; Lapeña, L. (2012). Influence of organic matter transformations on the bioavailability of heavy metals in a sludge based compost. *Journal of Environmental Management*, 95(SUPPL.), S104–S109. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.04.015>
- Irani, N. G.; Hernandez, J. M.; Grotewold, E. (2003). Chapter three Regulation of anthocyanin pigmentation. In: ROMEO, J. T. B. T.-R. A. IN P. (Ed.). *Integrative Phytochemistry: from Ethnobotany to Molecular Ecology*. [s.l.] Elsevier. v. 37p. 59–78.
- Islam, M.R., Jahan, R., Uddin, S., Harine, I.J., Hoque, M.A., Hassan, S., Hassan, M.M., Hossain, M.A. (2021). Lime and organic manure amendment enhances crop productivity of wheat–mungbean–T. Aman cropping pattern in acidic piedmont soils. *Agronomy* 11, 1595. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081595>.
- Jindo, K., Martim, S.A., Navarro, E.C., Pérez-Alfocea, F., Hernandez, T., Garcia, C., Canellas, L.P. (2012). Root growth promotion by humic acids from composted and non-composted urban organic wastes. *Plant Soil*, 353, 209–220.

- Kandil, F. E.; Grace, M. H.; Seigler, D. S.; Cheeseman, J. M. (2004). Polyphenolics in *Rhizophora mangle* L. leaves and their changes during leaf development and senescence. *Trees*, v.18, p.518-528.
- Kawalekar, S.J. (2013). Role of biofertilizers and biopesticides for sustainable agriculture. *J Biol Innov* 2:73–78.
- Ketterings Q, Ristow P, Aldrich B (2008). Potassium guidelines for Corn. Cornell Univ. Coop. Agron Fact Sheet 40:1–2. <http://nmsp.cals.cornell.edu/publications/factsheets/factsheet40.pdf>
- Khalil, A. I.; Hassouna, M. S.; El-Ashqar, H. M. A.; Fawzi, M. (2011). Changes in physical, chemical and microbial parameters during the composting of municipal sewage sludge. *World Journal of Microbiology ; Biotechnology*, v.27, n.10, p.2359-2369. <<http://dx.doi.org/10.1007/s11274-011-0704-8>
- Kiehl, E.J. (1985). Fertilizantes orgânicos. Editora Agronômica Ceres Ltda. Piracicaba. 492 p.
- Kim, M., Li, L. Y., Gorgy, T., ; Grace, J. R. (2017). Review of contamination of sewage sludge and amended soils by polybrominated diphenyl ethers based on meta-analysis. *Environmental Pollution*, 220, 753–765. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.10.053>
- Kwiatkowska-Malina J (2017). Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. *Appl Soil Ecol* 123:542–545. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.021>
- Kirchmann, H., Börjesson, G., Kätterer, T., ; Cohen, Y. (2017). From agricultural use of sewage sludge to nutrient extraction: A soil science outlook. *Ambio*, 46(2), 143–154. <https://doi.org/10.1007/S13280-016-0816-3/FIGURES/3>
- Kulikowska, D., (2016). Kinetics of organic matter removal and humification progress during sewage sludge composting. *Waste Manage. (Oxford)* 49, 196–203.
- Kwiatkowska-Malina J (2017). Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. *Appl Soil Ecol* 123:542–545. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.021>
- Lopez-Gonzalez, J. A. *et al.* (2013). Tracking organic matter and microbiota dynamics during the stages of lignocellulosic waste composting. *Bioresource technology*, v. 146, p. 574–584.
- Malavolta, E. ; V. G. C. ; O. S. A. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. Piracicaba: Potafos, 319p(2. ed.).
- Malta, T. S. (2001). Aplicação de lodos de estações de tratamento de esgotos na agricultura: estudo de caso do município de Rio das Ostras. Dissertação (Mestrado) - Fundação Oswaldo Cruz. Escola Nacional de Saúde Pública.

- MAPA (2005). Instrução Normativa nº. 23, de 31 de agosto de 2005. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Diário Oficial, Seção 1, p.12.
- MAPA (2016). Instrução Normativa nº. 07, de 12 de abril de 2016. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Diário Oficial, Seção 1, p.9.
- MAPA (2020). Instrução Normativa nº. 61, de 08 de julho de 2020. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Diário Oficial, Seção 1, p.5.
- Martínez-Ballesta, M. C. *et al.* (2010). Minerals in plant food: effect of agricultural practices and role in human health. A review. *Agronomy for sustainable development*, v. 30, n. 2, p. 295–309.
- Martínez, A. A.; Gea, G.; Arauzo, J.; Kersten, S. R. A.; Kootstra, A. M. J. (2014). Phosphorus recovery from sewage sludge char ash. *Biomass and Bioenergy*, Amsterdam, v. 65, p. 42-50.
- Marenco, R. A.; Lopes, N. F. (2011). *Fisiologia vegetal: Fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral*, 3. ed. Viçosa: Editora UFV. 486p.
- Melo, W., Delarica, D., Guedes, A., Lavezzo, L., Donha, R., de Araújo, A., de Melo, G., ; Macedo, F. (2018). Ten years of application of sewage sludge on tropical soil. A balance sheet on agricultural crops and environmental quality. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.254>
- Merzlyak, M.N., A.A. Gitelson, O.B. Chivkunova., Rakitin, V.Y. (1999). Nondestructive optical detection of leaf senescence and fruit ripening. *Physiol. Plant.* 106, 135–141.
- Merzlyak, M.N., Solovchenko, A.E., Smagin, A.I., Gitelson, A.A. (2005). Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and technique for non-destructive assessment. *Journal of plant physiology*, 162(2), 151-160.
- Mifflin, B.J., Lea, P.J. (1976). The pathway of nitrogen assimilation in plants. *Phytochemistry*, New York, v.15, p.873-885.
- Moreira, R. S., Lense, G. H. E., Fávero, L. F., Junior, B. M. O., Mincato, R. L. (2020). Estado nutricional e parâmetros fisiológicos de milho cultivado com lodo de esgoto. *Ciência e Agrotecnologia*. <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202044029919>
- Moghadam, H.R.T., Khamene, M.K., Zahedi, H. (2014). Effect of humic acid foliar application on growth and quantity of corn in irrigation withholding at different growth stages. *J Maydica*.59(2):124–8

- Nardi, S., Schiavon, M., Francioso, O. (2021). Chemical structure and biological activity of humic substances define their role as plant growth promoters. *Molecules*, 2256.
- Nartey, E. G., Amoah, P., Ofosu-Budu, G. K., Muspratt, A., Pradhan, S. kumar. (2017). Effects of co-composting of faecal sludge and agricultural wastes on tomato transplant and growth. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*, 6(1), 23–36. <https://doi.org/10.1007/S40093-016-0149-Z/TABLES/10>
- Nascimento, A. L. (2016). Caracterização microbiológica, química e presença de poluentes orgânicos em amostras de lodo de esgoto de São Paulo. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.
- Nascimento, C. W. A., Barros, D. A. S., Melo, E. E. C., ; Oliveira, A. B. (2004). Alterações químicas em solos e crescimento de milho e feijoeiro após aplicação de lodo de esgoto. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 28(2), 385–392. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000200017>
- Oarga-Mulec, A., Hanssen, J. F., Jenssen, P. D., ; Bulc, T. G. (2019). A comparison of various bulking materials as a supporting matrix in composting blackwater solids from vacuum toilets. *Journal of Environmental Management*, 243, 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.005>
- Ochał, P., Smreczak, B. (2020). Acidification of soils and current issues of liming. *Stud. Rep. IUNG-PIB* 63 (17), 9–19. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2020.63.01>.
- Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., Erasmi, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils. A review. *Geochemistry*, 76, 327–352.
- OLIVEIRA, A.D.S. (2006). Tratamento de esgoto pelo sistema de lodos ativados no Município de Ribeirão Preto, SP: Avaliação da remoção de metais pesados. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.
- Oliveira, E. C. A., Sartori, R. H., Garcez, T. B. (2008). Compostagem. Piracicaba–São Paulo, p. 19.
- ONU. Organização das Nações Unidas. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/wpcontent/uploads/2015/10/agenda2030-pt-br.pdf> > Acesso em 01.dez.2022.
- Peal, A., Evans, B., Blackett, I., Hawkins, P., ; Heymans, C. (2014). Fecal sludge management (FSM): analytical tools for assessing FSM in cities. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 4(3), 371–383. <https://doi.org/10.2166/washdev.2014.139>

- Peñuelas, J., F. Baret., Filella I. (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* 31, 221–230.
- Peñuelas, J., Pinol, J., Ogaya, R., Filella, I. (1997). Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International journal of remote sensing*, 18(13), 2869-2875.
- Pereira Neto, J. T. (2007). Manual de compostagem: processo de baixo custo. UFV.
- Pereira, M. S. (2015). Utilização de lodo de esgoto na agricultura. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, v. 9, n. 1, p. 01-08.
- PERS (2014). Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: SEA/INEA, 137 p.
- PESAGRO-RIO (2022). Informações básicas de cultivo de milho. Niterói, Empresa de Pesquisa Agropecuária do Estado do Rio de Janeiro, junho 2022, 6p. https://www.pesagro.rj.gov.br/sites/site_pesagro/files/arquivos_paginas/Milho%20Informa%C3%A7%C3%B5es%20b%C3%A1sicas%20de%20cultivo.pdf
- Pineda, Y. C., Perez, M. A. V.; Ballesta, R. J.; Flores, J. V. T. (2022). Evaluation of the potential use of biosolids in corn crop in the municipality of Puebla, Mexico. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture* 11: 497-513. Doi: 10.30486/IJROWA.2022.1944759.1373
- PROSAB (1999). Programa de Pesquisa em Saneamento Básico. Uso e manejo do lodo de esgoto na agricultura. Rio de Janeiro:PROSAB, 97p.
- Rai PK, Lee SS, Zhang M, *et al* (2019). Heavy metals in food crops: Health risks, fate, mechanisms, and management. *Environ Int* 125:365–385. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.067>
- Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M., Hoveidi, H. (2009). The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29(2), 570–573. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.012>
- Ribeiro, S.S. (2014). Cultura de milho no Brasil. *Semana acadêmica*, 1. Revista Científica.
- Rigby H, Clarke BO, Pritchard DL, Meehan B, Beshah F, Smith SR (2016). A critical review of nitrogen mineralisation in biosolids amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Sci Total Environ* 541:1310–1338. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.089>

- Rihani, M., Malamis, D., Bihaoui, B., Etahiri, S., Loizidou, M., Assobhei, O. (2010). In-vessel treatment of urban primary sludge by aerobic composting. *Bioresour Technol* 101:5988–5995
- Ritchie, H.; Rodés-Guirao, L.; Mathieu, E.; Gerber, M.; Ortiz-Ospina, E.; Hasell, J.; Roser, M. Population Growth. Published online at OurWorldInData.org. 2023. Available online: <https://ourworldindata.org/population-growth> (accessed on 22 June 2023).
- Rodríguez-Carretero, I., Canet, R., Quiñones A. (2023). Industrial-Scale Composting of Rice Straw and Sewage Sludge. *Agronomy*, 13, 2295. <https://doi.org/10.3390/agronomy13092295>
- Rowell, D. M., Prescott, C. E., Preston, C. M. (2001). Decomposition en nitrogen mineralization from biosolids and other organic materials: relationship with initial chemistry. *Journal of Environmental Quality*, v.30, n.4, p.1401-1410. <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2001.3041401x>
- Rusănescu, C.O., Rusănescu, M., Voicu, G., Paraschiv, G., Biris, S.S, Popescu, I.N. (2022). The Recovery of Vermicompost Sewage Sludge in Agriculture. *Agronomy*, 12, 2653.
- Rusănescu, C.O.; Voicu, G.; Paraschiv, G.; Begea, M.; Purdea, L.; Petre, I.C.; Stoian, E.V. (2022). Recovery of Sewage Sludge in the Cement Industry. *Energies*, 15, 2664.
- Sales, R. A. de, Sales, R. A de, Santos, R. A. dos., Quarteza W. Z., Berilli, S. S. da, Oliveira, E. C. de (2018). Influência de diferentes fontes de matéria orgânica em componentes fisiológicos de folhas da espécie schinus terebinthifolius raddi. (anacardiaceae). *Revista Scientia Agraria*. Versão On-line ISSN 1983-2443. Versão Impressa ISSN 1519-1125. SA vol. 19 n°. 1 Curitiba
- Sampaio, A. (2013). Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. *Revista DAE*, n. 193, p. 16-27. Disponível em: http://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_193_n_1503.pdf >. Acesso em: 14 mar. 2023.
- Santos AF, Almeida PV, Alvarenga P, *et al.*, (2021). From wastewater to fertilizer products: Alternative paths to mitigate phosphorus demand in European countries. *Chemosphere* 284:131258.
- Schaub, S. M., ; Leonard, J. J. (1996). Composting: An alternative waste management option for food processing industries. *Trends in Food Science ; Technology*, 7(8), 263–268. [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(96\)10029-7](https://doi.org/10.1016/0924-2244(96)10029-7)

- Scotti, R., Bonanomi, G., Scelza, R., Zoina, A., Rao, M.A. (2015). Organic amendments as sustainable tool to recovery fertility in intensive agricultural systems. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 15:333–352. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000031>.
- Siebielec, G., Łopatka, A., Smreczak, B., Kaczynski, R., Siebielec, S., Koza, P., Dach, J. (2020). Organic matter in mineral soils of Poland. *IUNG-PIB Stud. Rep.* 64 (18), 9–30. <https://doi.org/10.26114/sir.iung.2020.64.01>.
- Silva, F. C. da, Boaretto, A. E., Berton, R. S., Zotelli, H. B., Pexe, C. A., ; Bernardes, E. M. (2001). Efeito de lodo de esgoto na fertilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36(5), 831–840. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001000500014>
- Silva, R. L., Martins, L. D. V., Bantim Felicio Calou, I., Meireles de Deus, M. D. S.; Ferreira, P. M. P., Peron, A. P. (2015). Flavonóides: constituição química, ações medicinais e potencial tóxico. *Acta toxicológica argentina*, v. 23, n. 1.
- Silveira, L. S., ; Matos, S. M. S. (2021). Saneamento básico como direito humano fundamental. *Direito Ambiental e Sociedade*, 11(3), 105–124. <https://doi.org/10.18226/22370021.v11.n3.05>
- Singh RP, Agrawal M (2008). Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Manag* 28:347–358. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2006.12.010>
- Smith, S., ; De Smet, I. (2012). Root system architecture: insights from Arabidopsis and cereal crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 367(1595), 1441–1452.
- Soccol, V.T., Paulino, E.C., Pereira, J.T., Castro, E.A., Costa, A.O., Henning L, Andreoli, C. (2010). Organismos patogênicos presentes em lodo de esgoto a ser aplicado no solo e a Resolução nº375 do CONAMA. In: Coscione A.R.; Nogueira T.A.R.; Pires A.M.M. (eds): *Uso agrícola de lodo de esgoto: avaliação após a Resolução nº375 do CONAMA*. 1ª ed. Botucatu: FEPAF, p.83-112.
- Souza, W. J. O. (2004). Fósforo em solo tratado com biossólido e cultivado com milho. Tese (doutorado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade Estadual PAulista.).
- Spinosa, L., ; Doshi, P. (2021). Re-thinking sludge management within the Sustainable Development Goal 6.2. *Journal of Environmental Management*, 287, 112338. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112338>
- Stentiford, E. I. (1996). Composting Control: Principles and Practice. In *The Science of Composting* (pp. 49–59). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-1569-5_6

- Sullivan, D. M., Bary, A. I., Thomas, D. R., Fransen, S. C., ; Cogger, C. G. (2002). Food Waste Compost Effects on Fertilizer Nitrogen Efficiency, Available Nitrogen, and Tall Fescue Yield. *Soil Science Society of America Journal*, 66(1), 154–161. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.1540a>
- Taiz, L.; Zeiger, E. (2017). *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.
- Tontti, T., Poutiainen, H., Heinonen-Tanski, H., (2017). Efficiently treated sewage sludge supplemented with nitrogen and potassium is a good fertilizer for cereals. *Land Degrad. Dev.* 28:742–751. <https://doi.org/10.1002/ldr.2528>.
- Thompson, J.E., Froese, C.D., Madey, E., Smith, M.D., Hong, Y. (1998). Lipid. *Metabolismo during plant senescence*. *Progress in Lipids Research*, v. 37, n. 2/3, p. 119-141.
- Torres de Carvalho, P. C. (2002). *Compostagem. Biossólidos na agricultura*. (2a). ABES/SP.
- Tiruneh, A. T.; Fadiran, A. O.; Mtshali, J. S. (2014). Evaluation of the risk of heavy metal in sewage sludge intended for agricultural application in Swaziland. *International Journal of Environmental Sciences*, New York, v. 5, n. 1, p. 197-216.
- Tsozué, D., Noubissie, N.M.M., Mamdem, E.L.T., Basga, S.D., Oyono, D.L.B. (2021). Effects of environmental factors and soil properties on soil organic carbon stock in a natural dry tropical area of Cameroon. *Soil* 7, 677–691. <https://doi.org/10.5194/soil-7-677-2021>.
- Tsutiya, M. T. (2001). Alternativas de disposição final de biossólidos. In: TSUTIYA, M.T. *et al* (Ed.) *Biossólidos na Agricultura*. SABESP.
- USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Grain: world Markets and trade. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov>. Acesso em: 13 dez. 2022.
- Usman, K., Khan, S., Ghulam, S., Khan, M. U., Khan, N., Khan, M. A., ; Khalil, S. K. (2012). Sewage Sludge: An Important Biological Resource for Sustainable Agriculture and Its Environmental Implications. *American Journal of Plant Sciences*, 03(12), 1708–1721. <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.312209>
- Vaca, R. *et al.* (2011). Effects of sewage sludge and sewage sludge compost amendment on soil properties and Zea mays L. plants (heavy metals, quality and productivity). *Rev. Int. Contam. Ambie.* v. 27, n. 4, p. 303-311.
- Vergnoux, A., M. Guiliano, Y. Le Dréan, J. Kister, N. Dupuy and P. Doumenq. (2009). Monitoring of the evolution of an industrial compost and prediction

of some compost properties by NIR spectroscopy. *Sci. Total Environ.* <http://www.sciencedirect.com>. Acessado em: 12/03/2009.

- Verlicchi, P., ; Zambello, E. (2015). Pharmaceuticals and personal care products in untreated and treated sewage sludge: Occurrence and environmental risk in the case of application on soil — A critical review. *Science of The Total Environment*, 538, 750–767. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.108>
- Von Sperling, M. (2005). Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. (3a). Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. Princípios de tratamento biológico de águas residuárias. v1.
- Wang, X., Chen, T., Ge, Y., ; Jia, Y. (2008). Studies on land application of sewage sludge and its limiting factors. *Journal of Hazardous Materials*, 160(2–3), 554–558. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.046>
- Wang, Y., Gong, J., Li, J., Xin, Y., Hao, Z., Chen, C., Li, H., Wang, B., Ding, M., Li, W., Zhang, Z., Xu, P., Xu, T., Ding, G. C., Li, J. (2020). Insights sobre a diversidade bacteriana no composto: microbioma central e prevalência de bactérias potencialmente patogênicas. *Science of The Total Environment*. Volume 718, 137304.
- Weil, R.R.; Brady, N.C (2017). *The Nature and Properties of Soils*, 15th ed.; Pearson Columbus: Columbus, OH, USA, 2017
- World-O-Meter (2023). Available online: <https://www.worldometers.info/hu> (accessed on 15 June 2023)
- Xin, X., Zhang, J., Zhu, A., Zhang, C. (2016). Effects of long-term (23 years) mineral fertilizer and compost application on physical properties of fluvo-aquic soil in the North China Plain. *Soil . Res.* 156, 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.10.012>.
- Xiong, D., Chen, J., Yu, T., Gao, W., Ling, X., Li, Y., Peng, S., ; Huang, J. (2015). SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Science and Reports*, 5, 13389.
- Xu, G. (2014). Analysis of Sewage Sludge Recovery System in EU-in Perspectives of Nutrients and Energy Recovery Efficiency, and Environmental Impacts. Norwegian University of Science and Technology.
- Xu, L., Geelen, D. (2018). Developing biostimulants from agro-food and industrial by-products. *Front. Plant Sci.* 9, 1567
- Yagmur, M., Arpali, D., ; Gulser, F. (2017). The Effects Of Sewage Sludge Treatment On Triticale Straw Yield And Its Chemical Contents In Rainfed Condition. *The J. Anim. Plant Sci.*, 27(3). <http://openaccess.ahievran.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12513/4142>

- Zigmontienė, A., Serevicienė V. (2023). Nitrogen sequestration during sewage sludge composting and vermicomposting. *The Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 31 (2): 157–163. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2023.19298>
- Zuba-Junio GR, Sampaio RA, Nascimento AL, *et al* (2012). Corn yield response to residual effect of fertilization with sewage sludge compost and rock phosphate. *Rev Bras Eng Agric e Ambient* 16:1289–1297. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001200005>