CAPÍTULO 6

Uso de resíduos de esgoto em sistemas de produção agroecológicos: formas, leis e resultados

Esteffany Pereira da Silva, Oseas de Almeida Lima, Maurício Novaes Souza, Thaís de Souza Pastor, Willian Moreira da Costa

https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-33-6.c6

Resumo

Os resíduos de esgoto representam um dos maiores problemas ambientais atuais, especialmente devido às suas elevadas taxas de contaminação. No contexto agrícola, resíduos como lodos de esgoto, restos de lavoura e resíduos agropecuários têm potencial de aplicação em sistemas agroecológicos. Pesquisas demonstram que, após tratamento adequado, esses materiais podem ser transformados em biofertilizantes, fornecendo nutrientes para as culturas e promovendo alternativas sustentáveis, especialmente em sistemas agroflorestais. Contudo, o manejo desses resíduos requer atenção à legislação, devido à presença potencial de substâncias tóxicas e metais pesados. Para ampliar sua viabilidade, é fundamental o investimento em regulamentações e tecnologias que garantam a segurança e a eficiência do uso desses compostos.

Palavras-chave: Biofertilizantes. Sistemas agroecológicos. Sustentabilidade agrícola. Agroflorestas. Tratamento de resíduos. Contaminação ambiental. Legislação ambiental.

Maurício Novaes Souza (Org.) © 2025 Mérida Publishers CC-BY 4.0

1. Introdução

Nos últimos anos, diversas pesquisas têm destacado o potencial do lodo de esgoto doméstico na recuperação de solos degradados e depauperados. Essa prática se configura como uma abordagem agroecológica sustentável, trazendo benefícios significativos tanto para a agricultura quanto para o meio ambiente. Entre suas principais vantagens, encontra-se a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, o aumento da fertilidade e da produtividade agrícola, além da redução do descarte inadequado de resíduos no meio ambiente (Keller *et al*., 2012; Andrade *et al*., 2020).

O lodo de esgoto é especialmente rico em nutrientes essenciais, como nitrogênio e fósforo, fundamentais para o desenvolvimento das culturas agrícolas. Sua aplicação também melhora a retenção de água, a porosidade e a agregação do solo, contribuindo para a conservação dos recursos naturais (Andrade *et al*., 2020). Estudos apontam que os biossólidos favorecem a ciclagem de nutrientes, a deposição de matéria orgânica e a redução da dependência de fertilizantes químicos, promovendo impactos positivos na sustentabilidade dos sistemas produtivos (Melo; Montanari, 2020).

Apesar de seus benefícios, a presença de metais pesados no lodo de esgoto representa uma das principais limitações ao seu uso agrícola. Em muitos casos, as concentrações desses elementos excedem os níveis naturalmente encontrados nos solos, podendo gerar riscos ao ambiente e à saúde humana. Assim, é fundamental realizar avaliações criteriosas dos impactos potenciais da aplicação de lodo em solos agricultáveis e desenvolver técnicas de manejo que minimizem tais riscos (Messias *et al*., 2007).

Além de atuar como condicionador de solo, o lodo de esgoto pode ser incorporado em sistemas agroecológicos, especialmente durante a transição agroecológica. Essa abordagem permite que agricultores utilizem recursos disponíveis de maneira mais sustentável, promovendo a preservação ambiental e a redução dos custos de produção (Paz-Ferreiro *et al*., 2018). Segundo Bernardes (2017), a integração de sistemas como os silvipastoris amplifica os benefícios do uso de biossólidos, favorecendo a ciclagem de nutrientes, a conservação hídrica e a diminuição da necessidade de insumos externos.

No cenário atual, marcado pela urbanização acelerada e pelo consumo excessivo de recursos naturais, o uso de biossólidos na agricultura se apresenta

como uma alternativa promissora. Além de reduzir os impactos do descarte inadequado, essa prática contribui para o manejo sustentável dos solos e para a mitigação das mudanças climáticas, por meio do sequestro de carbono e da diminuição da pegada de carbono associada aos fertilizantes minerais (Chang *et al*., 2019; Martins *et al*., 2021).

Com o manejo adequado, os biossólidos se tornam uma solução economicamente viável para agricultores de diferentes escalas, fortalecendo a transição para sistemas mais resilientes e sustentáveis. Assim, sua utilização deve ser incentivada, acompanhada por políticas públicas que garantam a segurança ambiental e promovam práticas agroecológicas baseadas em evidências científicas.

O objetivo deste capítulo foi analisar o potencial do uso de lodo de esgoto na agricultura, destacando suas vantagens e desafios no contexto agroecológico. Busca explorar como essa prática pode contribuir para a recuperação de solos degradados, o manejo sustentável dos recursos naturais e a mitigação de impactos ambientais, ao mesmo tempo em que discute os riscos associados, como a presença de metais pesados, e a necessidade de regulamentações e técnicas de manejo apropriadas. Além disso, o capítulo pretende demonstrar como essa abordagem pode ser integrada a sistemas agroecológicos e produtivos resilientes, promovendo benefícios econômicos, sociais e ambientais.

2. Tratamento de resíduos de esgoto

A Companhia Espírito-Santense de Saneamento (CESAN), ilustrada na Figura 1, opera diversas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), exemplificadas nas Figuras 2 e 3. A empresa utiliza três principais sistemas de tratamento: lagoas de estabilização, reatores UASB e sistemas de lodo ativado. Esses métodos são projetados para atender às exigências legais, preservar o meio ambiente e melhorar a qualidade de vida da população (CESAN, 2013).

Figura 1. Lagoa de Estabilização. Fonte: CESAN, 2013.

Figura 2. Reatores UASB ETE em Itaúnas, Conceição da Barra. Fonte: CESAN, 2013.

Figura 3. Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) tipo Lodo Ativado - ETE em Manguinhos – Serra. Fonte: CESAN, 2013.

Pesquisas recentes destacam que o uso de biossólidos pode superar o desempenho de fertilizantes tradicionais em termos de melhoria da estrutura do solo e disponibilidade de nutrientes (Lal, 2020). Além disso, sistemas agroflorestais têm mostrado potencial para integrar esse recurso de maneira sustentável, promovendo o sequestro de carbono e a regeneração de áreas degradadas (Paz-Ferreiro et al., 2018).

3. Etapas do tratamento de esgoto na ETE

Para atender às exigências legais, o esgoto bruto deve passar por diferentes níveis de tratamento, incluindo as etapas preliminar e biológica. Em situações específicas, podem ser aplicados tratamentos físico-químicos e a desinfecção do esgoto tratado. Durante o processo, ocorre a geração de lodo e gases, que podem ser submetidos a tratamentos específicos para seu manejo adequado (CESAN, 2013).

3.1. Tratamento preliminar

A CESAN, apresentada na Figura 1, opera Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), como as mostradas nas Figuras 2 e 3. No tratamento preliminar, o gradeamento (Figura 4) e os desarenadores ocorrem na fase inicial (CESAN, 2013).

Figura 4. Gradeamento na ETE Mulembá – Vitória.

O tratamento preliminar visa remover sólidos grosseiros em suspensão, como areia, plásticos e papéis, geralmente oriundos do uso incorreto do sistema de esgoto. Tanques desarenadores (Figura 5) utilizam a força gravitacional para sedimentar partículas pesadas, enquanto o gradeamento retém resíduos maiores (CESAN, 2013).

Figura 5. Tanques desarenadores. Fonte: Universidade Estadual de Campinas, 2019.

3.2. Tratamento biológico

Existem diferentes tipos de tratamento de esgoto doméstico, que utilizam processos biológicos aeróbios e anaeróbios, cada um com vantagens e desvantagens. Esses processos empregam microrganismos que proliferam na água, aperfeiçoando o tratamento e reduzindo custos, com o objetivo de alcançar a maior eficiência possível. Um exemplo é o sistema de Lodo Ativado, no qual o esgoto é conduzido a um tanque aerado, onde é submetido à aeração (CESAN, 2013).

De acordo com esse mesmo autor, a quantidade de oxigênio introduzida na mistura por meio dos aeradores influencia diretamente no desenvolvimento de bactérias aeróbias, responsáveis por digerir a matéria orgânica carbonácea e realizar a nitrificação do nitrogênio orgânico remanescente do afluente bruto. Nesse processo, microrganismos específicos formam flocos conhecidos como lodo ativado ou lodo biológico. Parte do lodo é recirculada para manter a atividade biológica no sistema, enquanto o excedente é enviado para deságue e

destinação em aterros ou outros tratamentos específicos. O efluente tratado, por sua vez, é direcionado para corpos d'água receptores, como rios.

O tratamento biológico pode ser realizado em sistemas aeróbios ou anaeróbios. Nos sistemas aeróbios, como o de Lodo Ativado, bactérias consomem matéria orgânica e formam flocos biológicos em tanques aerados. Apesar de apresentar vantagens como maior remoção de matéria orgânica e nutrientes, esse sistema exige altos níveis de energia para manter a aeração constante. Já os reatores UASB, que operam em condições anaeróbias, são amplamente utilizados no Brasil, especialmente em regiões de clima tropical, devido à sua eficiência e à produção de biogás como subproduto, o que contribui para a sustentabilidade do processo (Chernicharo, 2007; Tchobanoglious *et al*., 2014).

3.3. Desinfecção do efluente (esgoto tratado)

Para que o esgoto tratado seja devolvido à natureza, a CESAN precisa cumprir as exigências estabelecidas pela Legislação Ambiental. Nesse contexto, o efluente é submetido a um processo de desinfecção utilizando lâmpadas de radiação ultravioleta (UV), conforme ilustrado na Figura 6. Durante esse processo, ao entrar em contato com a radiação UV, os microrganismos presentes no efluente são esterilizados, o que impede sua reprodução e garante maior segurança ambiental no descarte do efluente tratado (CESAN, 2013).

Figura 6. Sistema UV. Fonte: CESAN, 2013.

4. Lodo de esgoto

O lodo é formado durante o processo de decomposição da matéria orgânica presente no esgoto, realizado principalmente por micro-organismos, como bactérias. Para reduzir sua umidade, o lodo passa por um processo de deságue que, dependendo da tecnologia empregada, pode resultar em características semissólidas/pastosas ou sólidas. Por ser orgânico e rico em nutrientes, o lodo de esgoto apresenta grande potencial para utilização na agricultura, trazendo benefícios como o aumento da fertilidade do solo e o incremento no teor de matéria orgânica, fatores que contribuem diretamente para o aumento da produtividade agrícola (CESAN, 2013).

Figura 7. Lodo de Esgoto – ETE Mulembá. Fonte: CESAN, 2013

O lodo de esgoto é definido pela Norma Técnica Brasileira (NBR) nº 12.209/2011 como uma suspensão aquosa composta por componentes minerais e orgânicos tratados no sistema de tratamento de esgoto. O processo de descarte do lodo exige tratamento específico para reduzir sólidos biodegradáveis e odores, estabilizar a matéria orgânica, diminuir o volume e combater a presença de vetores. Após o tratamento e estabilização, o lodo de esgoto é denominado biossólido, pronto para o descarte adequado (Abreu, 2014).

5. Legislação

No Brasil, a Norma Brasileira (NBR) nº 10004/2004 classifica os resíduos sólidos em quatro classes (I, II, IIA e IIB), e o lodo de esgoto é classificado de

acordo com a fonte poluidora (ABNT NBR 10004, 2004). Além disso, a Resolução CONAMA nº 375/2006 define os critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento, estabelecendo regras para o uso de lodo na agricultura, regulamentadas por Instruções Normativas e pela Resolução nº 380/2006 (CONAMA, 2006).

A Resolução, ao entrar em vigor após a publicação no Diário Oficial da União, estabelece as estações de tratamento de esgoto no Brasil em conformidade com um instrumento legal de controle e monitoramento, visando garantir cuidados específicos ao disponibilizar o resíduo para a agricultura.

O principal objetivo da resolução é assegurar a destinação final adequada do produto gerado pelas estações de tratamento de esgoto, evitando que o material seja descartado em aterros sanitários. Dessa forma, busca-se proteger o meio ambiente e a saúde pública, alinhando-se a práticas adotadas em outros países que já regulamentam o uso agrícola de resíduos de esgoto.

De acordo com a coordenadora-técnica do CONAMA, Dominique Louette, o lodo de esgoto contém matéria orgânica e nutrientes benéficos para as plantas, contribuindo para a melhoria da qualidade do solo e da produção agrícola, trazendo benefícios aos agricultores, principalmente quando o lodo é de boa qualidade. A resolução, portanto, visa garantir que o lodo a ser aplicado na agricultura atenda a padrões de qualidade, com limites máximos para metais pesados e agentes patogênicos, como fungos, bactérias e vírus.

A norma estabelece que os lodos gerados em sistemas de tratamento de esgoto, para uso agrícola, devem passar por processos de redução de patógenos e da atratividade de vetores de doenças. A resolução também impõe restrições ao uso do lodo em áreas de pastagem, unidades de conservação, cultivo de alimentos consumidos in natura, e plantações com contato direto com o solo.

O Art. 10º da resolução estabelece que os lotes de lodo de esgoto e produtos derivados para uso agrícola devem atender aos limites de concentração de elementos químicos tóxicos, classificados em Classe 1 ou Classe 2, conforme os valores máximos permitidos de elementos químicos,

como especificado nas Tabelas 1 e 2, e que esses limites não podem ser ultrapassados em qualquer amostra analisada (CONAMA, 2006).

Tabela 1. Valores máximos permitidos de substâncias químicas no biossólido a ser destinado para uso, em solos

Substâncias Químicas	Valor Máximo permitido no biossólido (mg/kg^{-1} ST)	
	CLASSE 1	CLASSE 2
Arsênio	41	75
Bário	1300	1300
Cádmio	39	85
Chumbo	300	840
Cobre	1.500	4.300
Cromo	1.000	3.000
Mercúrio	17	57
Molibdênio	50	75
Níquel	420	420
Selênio	36	100
Zinco	2.800	7.500

Fonte. Adaptado da Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2006, do CONAMA.

A Tabela 1 da **Resolução CONAMA nº 375/2006** estabelece os valores máximos permitidos de metais pesados e outros elementos químicos em biossólidos, expressos em mg/kg de sólidos totais (ST), com base nas classificações em **Classe 1** e **Classe 2**. A aplicação desses biossólidos na agricultura ou disposição em solos depende da concentração dos contaminantes presentes. A **Classe 1** permite um uso mais amplo, incluindo em solos para culturas agrícolas, reflorestamento e recuperação de áreas degradadas, desde que atendidos os critérios de aplicação. Já a **Classe 2** contém concentrações mais elevadas de contaminantes e exige cuidados adicionais, como monitoramento constante e aplicação controlada, para evitar impactos ambientais e à saúde humana.

Entre os elementos químicos, o **arsênio (As)** apresenta limites de **41 mg/kg** na Classe 1 e **75 mg/kg** na Classe 2. Este metal é tóxico para plantas e seres humanos, podendo acumular-se no solo e na cadeia alimentar. O **bário (Ba)**, com limite de **1.300 mg/kg** para ambas as classes, é menos tóxico, mas

em excesso pode prejudicar o solo e os organismos aquáticos. O **cádmio (Cd)**, com valores de **39 mg/kg** na Classe 1 e **85 mg/kg** na Classe 2, é altamente tóxico e pode se acumular nas plantas, afetando órgãos como os rins e ossos. O **chumbo (Pb)**, um metal cumulativo e tóxico, apresenta limites de **300 mg/kg** na Classe 1 e **840 mg/kg** na Classe 2, sendo prejudicial aos organismos vivos.

O **cobre (Cu)** possui limites de **1.500 mg/kg** na Classe 1 e **4.300 mg/kg** na Classe 2. Embora essencial para as plantas em pequenas quantidades, o cobre torna-se tóxico em concentrações elevadas, podendo afetar as raízes e a microbiota do solo. O **cromo (Cr)** apresenta limites de **1.000 mg/kg** para a Classe 1 e **3.000 mg/kg** para a Classe 2, sendo altamente tóxico na forma hexavalente. O **mercúrio (Hg)**, com limites de **17 mg/kg** na Classe 1 e **57 mg/kg** na Classe 2, apresenta alta toxicidade e bioacumulação, representando risco à saúde. O **molibdênio (Mo)**, essencial em pequenas quantidades, tem limites de **50 mg/kg** na Classe 1 e **75 mg/kg** na Classe 2, sendo tóxico em excesso.

O **níquel (Ni)** tem limite de **420 mg/kg** para ambas as classes, sendo essencial para algumas plantas, mas prejudicial em concentrações elevadas. O **selênio (Se)**, embora essencial, pode ser tóxico em níveis elevados, com limites de **36 mg/kg** na Classe 1 e **100 mg/kg** na Classe 2. O **zinco (Zn)**, um micronutriente fundamental, apresenta os maiores limites, com **2.800 mg/kg** na Classe 1 e **7.500 mg/kg** na Classe 2, sendo prejudicial em concentrações excessivas.

Esses limites visam garantir que os biossólidos aplicados na agricultura estejam dentro de parâmetros seguros, evitando a contaminação do solo, a saúde das plantas, dos animais e dos seres humanos. O biossólido da **Classe 2**, que contém concentrações mais elevadas de contaminantes, só poderá ser aplicado nos solos se a taxa máxima anual e a carga máxima acumulada de substâncias químicas não ultrapassarem os limites estabelecidos na **Tabela 2**, conforme regulamentação do CONAMA.

A **Tabela 2** estabelece os limites para a aplicação de metais pesados no solo, organizados em três parâmetros principais: a **taxa máxima anual (kg ha^{-1} ano^{-1})**, que indica a quantidade permitida anualmente por hectare de cada substância química, e a **carga máxima acumulada (kg ha^{-1})**, que refere-se à

quantidade total permitida ao longo do tempo, com diferenciação entre solos de áreas degradadas e solos de áreas não degradadas. Os metais pesados apresentados na tabela, como **arsênio (As)**, **bário (Ba)**, **cádmio (Cd)**, **cromo (Cr)**, **cobre (Cu)**, **chumbo (Pb)**, **mercúrio (Hg)**, **molibdênio (Mo)**, **níquel (Ni)**, **selênio (Se)** e **zinco (Zn)**, embora possam estar presentes em resíduos como o lodo de esgoto utilizados na agricultura, representam sérios riscos ambientais e à saúde humana quando acumulados em excesso. O controle rigoroso dessas substâncias no solo é essencial para evitar a contaminação do ambiente, a degradação do solo e impactos adversos na saúde das plantas, animais e seres humanos.

Tabela 2. Taxa máxima anual e carga máxima acumulada de substâncias químicas em solos quando do uso de biossólido Classe 2

Substâncias químicas	Taxa máxima anual (kg ha^{-1} ano^{-1})	Carga máxima acumulada (kg ha^{-1})	
		Solos de áreas degradadas	Solos de áreas não degradadas
Arsênio	2	20	41
Bário	13	130	260
Cádmio	1,9	19	39
Cromo	150	1500	3000
Cobre	75	750	1500
Chumbo	15	150	300
Mercúrio	0,85	8,5	17
Molibdênio	0,65	6,5	13
Níquel	21	210	420
Selênio	5	50	100
Zinco	140	1400	2800

Fonte. Adaptado da Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2006, do CONAMA.

O cádmio, por exemplo, apresenta uma taxa máxima anual de 1,9 kg ha^{-1} ano^{-1} e uma carga máxima acumulada de 19 kg ha^{-1} em solos de áreas degradadas, enquanto em solos não degradados, esses limites são de 39 kg ha^{-1}. Já o zinco possui limites bem mais elevados, com uma taxa máxima anual de 140 kg ha^{-1} ano^{-1} e uma carga acumulada de 1400 kg ha^{-1} em solos degradados e 2800 kg ha^{-1} em solos não degradados. Esses valores sublinham a necessidade de um monitoramento rigoroso na aplicação de resíduos no solo,

como o lodo de esgoto, a fim de evitar a contaminação e garantir que o uso agrícola ou a recuperação do solo sejam realizados de forma sustentável.

O uso de resíduos, como os biossólidos provenientes de estações de tratamento de esgoto (ETEs), tem se tornado uma prática cada vez mais comum devido ao seu potencial de fornecer nutrientes essenciais ao solo, como nitrogênio e fósforo, além de atuar como condicionador, melhorando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Conforme observado por Von Sperling (2020) e Melo *et al*. (2018), a aplicação de lodo de esgoto pode aumentar a produtividade agrícola ao melhorar características do solo, como a retenção de água, a porosidade e a disponibilidade de nutrientes. No entanto, a presença de metais pesados é uma limitação significativa, pois a aplicação inadequada pode resultar em contaminação do solo, afetar os ecossistemas e representar riscos à saúde humana, uma vez que esses metais podem ser absorvidos pelas plantas e entrar na cadeia alimentar.

Vale ressaltar que, conforme a **Resolução CONAMA nº 375/2006**, é proibido o uso de qualquer classe de lodo de esgoto ou seus derivados em pastagens, no cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e em culturas inundadas, além de outras culturas cujas partes comestíveis entrem em contato com o solo. Em solos onde o lodo de esgoto ou produto derivado for aplicado, as pastagens poderão ser implantadas apenas após um período mínimo de 24 meses após a última aplicação. Já o plantio de olerícolas, tubérculos, raízes e outras culturas cujas partes comestíveis entram em contato com o solo, assim como cultivos inundáveis, só poderão ocorrer após um período mínimo de 48 meses após a última aplicação (CONAMA, 2006).

Para assegurar a segurança do uso do lodo de esgoto na agricultura, normas nacionais e internacionais, como a **Resolução CONAMA nº 375/2006** e a **ABNT NBR 10004 (2004)** estabelecem limites de metais pesados e critérios de monitoramento. Estudos, como o de Silva *et al*. (2016), destacam a importância de respeitar esses limites, especialmente em solos agrícolas que recebem resíduos orgânicos e lodos. A distinção entre solos degradados e não degradados é fundamental, pois áreas degradadas, por estarem em processo de recuperação, exigem limites mais restritivos para evitar o acúmulo excessivo de contaminantes e garantir o equilíbrio do ecossistema em longo prazo.

Além disso, o uso sustentável desses resíduos auxilia no enfrentamento de desafios ambientais, como o descarte inadequado de resíduos sólidos e líquidos. Paz-Ferreiro *et al*. (2018) indicam que a utilização de biossólidos como condicionadores de solo não só mitiga problemas relacionados ao descarte inadequado de resíduos urbanos, mas também se apresenta como uma alternativa viável para o manejo sustentável dos solos, promovendo a conservação ambiental e reduzindo a dependência de fertilizantes minerais. Dessa forma, o manejo adequado do lodo de esgoto pode ser integrado a práticas agroecológicas, proporcionando uma alternativa sustentável e economicamente viável, especialmente em áreas de transição agroecológica, beneficiando a produtividade agrícola e a recuperação de solos degradados.

Portanto, a aplicação de lodo de esgoto em solos deve ser realizada com critérios rigorosos, respeitando os limites para metais pesados e os períodos de carência para plantio e pastagem estabelecidos pelas regulamentações vigentes. A adoção dessa prática não apenas promove uma agricultura mais sustentável, mas também contribui para a preservação dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ambientais associados ao descarte inadequado de resíduos.

6. Formas de aplicação nos sistemas agroecológicos

Uma das formas mais vantajosas de utilizar o resíduo de esgoto é sua aplicação em plantios florestais, na forma de adubação orgânica. O uso planejado desses resíduos pode trazer benefícios significativos ao meio ambiente, ao mesmo tempo em que aproveita o resíduo e melhora a qualidade do solo, contribuindo para o aumento da produtividade agrícola. Ao elevar a matéria orgânica no solo, as plantas cultivadas obtêm melhores condições nutricionais, o que favorece seu crescimento e desenvolvimento. Além disso, a utilização de lodo de esgoto como adubo orgânico é uma solução economicamente viável para o produtor, pois reduz a necessidade de fertilizantes químicos, com vantagens tanto ambientais quanto econômicas (Santos *et al*., 2014).

O lodo de esgoto, devido às suas características favoráveis, pode ser aplicado em plantios florestais como fertilizante ou condicionador do solo. Dessa forma, contribui para a sustentabilidade dos plantios, ao mesmo tempo em que ajuda a balancear os passivos ambientais e econômicos associados à destinação desses resíduos. Ao ser utilizado de maneira adequada, o lodo de esgoto permite sua disposição mais segura ao ecossistema, além de ser vantajoso economicamente. Uma das alternativas para a conservação e recuperação de solos é o uso de lodo de esgoto doméstico em solos agricultáveis, como apontado por Shizuo *et al*. (2021) (Figura 8).

Figura 8. Aplicação de cal no solo com lodo de esgoto. Foto: Ivan Monteiro, 2020.

Quando utilizado como insumo agrícola, o lodo de esgoto se torna uma valiosa fonte de matéria orgânica, além de fornecer macro e micronutrientes essenciais para o solo. Esse uso contribui para aumentar a capacidade de retenção de água, melhorar a resistência à erosão e reduzir a dependência de fertilizantes minerais. Além disso, o lodo pode favorecer a resistência das plantas aos fitopatógenos, promovendo um ambiente mais saudável para o desenvolvimento das culturas (Figuras 9 e 10).

Figura 9. Compostagem do lodo. Fonte: Terra Ambiental, 2023.

Figura 10. Aplicação de cal virgem no lodo de esgoto. Fonte: Biblioteca do Incaper, 2022.

Estudos têm avançado significativamente na aplicação de resíduos de esgoto em sistemas agroecológicos, desenvolvendo critérios rigorosos para seu uso. À medida que a demanda por esses resíduos aumenta no contexto agrícola, a conformidade com a legislação pertinente se torna um fator fundamental para maximizar a potencialidade de produção em sistemas agroecológicos. Em particular, o lodo de esgoto tem sido cada vez mais utilizado em silvicultura, onde pode contribuir para o aprimoramento da qualidade do solo e o crescimento das plantações de maneira sustentável (Figura 11).

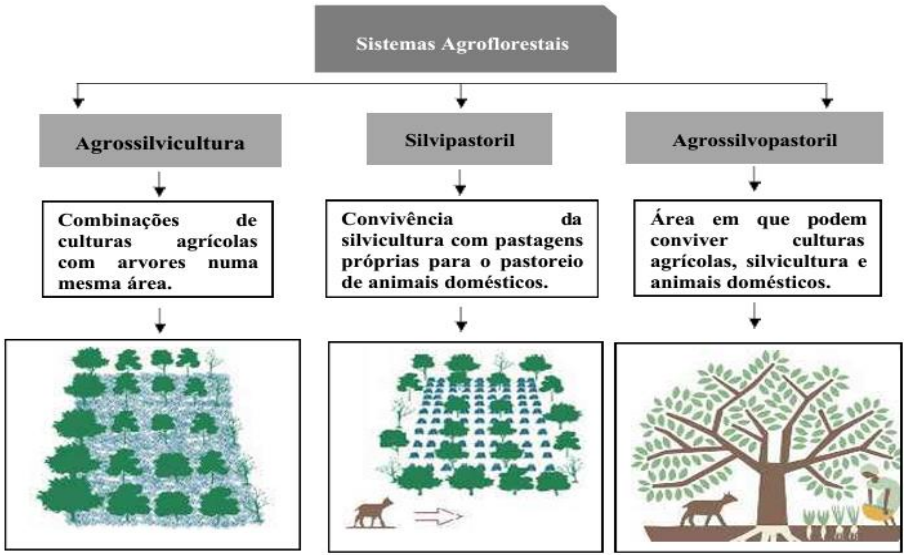

Figura 11. Tipos de sistemas agroflorestais. Fonte: Revista Campo & Negócio, 2022.

Em áreas degradadas, especialmente em sistemas agroflorestais, a aplicação de resíduos de esgoto tem mostrado resultados positivos, como evidenciado por um experimento realizado no semiárido brasileiro. Este estudo teve como objetivo avaliar as características químicas de um solo degradado irrigado com água residuária. As amostras da água residuária utilizada foram analisadas conforme os métodos estabelecidos pela APHA (2012), e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3. Esses resultados foram coletados do reservatório de armazenamento após os tratamentos primário e secundário na estação, conforme realizado na Estação Experimental de Tratamento de Águas e Esgotos Extrabes (SILVA, 2019).

Tabela 3. Caracterização do esgoto doméstico utilizado na irrigação da área experimental.

pH	CE	N	P	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	COT	SDT	DQO	NH_4^+	NO_3^-	Na^+	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^-
-	dSm^{-1}	---------- mg L^{-1} ----------													-
8,1	1,37	24,2	12	9,2	50,3	3,5	684	32	21,2	4,7	21,9	2,3	23,3	10,1	267

pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; N: Nitrogênio total; P: Fósforo; PO_4^{3-}: Ortofosfato; SO_4^{2-}: Sulfato de magnésio; COT: Carbono orgânico total; SDT: Sais dissolvidos totais; DQO: Demanda química de oxigênio; NH^{4+}: Amônio; NO^{3-}: Nitrato; Na^+: Sódio; K^+: Potássio; Ca^{+2}: Cálcio; Mg^{+2}: Magnésio; Cl^-: Cloreto.

Fonte: Silva, 2019.

O esgoto doméstico analisado na Tabela 3 apresenta um pH de 8,1, indicando uma solução levemente alcalina, e uma condutividade elétrica (CE) de 1,37 dS m^{-1}, o que sugere a presença de sais dissolvidos na água. Os níveis de nutrientes, como nitrogênio total (24,2 mg L^{-1}), fósforo (12 mg L^{-1}) e potássio (21,9 mg L^{-1}), destacam o potencial do esgoto como uma fonte de elementos essenciais para as plantas. A demanda química de oxigênio (DQO), que reflete a carga orgânica do esgoto, foi de 684 mg L^{-1}. Além disso, foram observados íons importantes, como amônio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{+2}) e cloreto (Cl^-), que influenciam a qualidade da água e sua adequação para irrigação.

Estudos, como o de Medeiros *et al*. (2010), indicam que o uso de águas residuais na agricultura pode ser benéfico ao fornecer nutrientes ao solo, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos. Contudo, Silva e Alves (2015) alertam que a presença excessiva de sais e cloretos, comuns no esgoto doméstico, pode levar à salinização do solo e prejudicar o desenvolvimento de culturas mais sensíveis. Fonseca *et al*. (2018) destacam que, com um manejo adequado e monitoramento rigoroso, o uso de esgoto tratado na irrigação pode ser uma prática sustentável, resultando em maior produtividade agrícola, economia de recursos hídricos e redução do uso de fertilizantes.

Assim, a análise detalhada dos parâmetros físico-químicos e biológicos é fundamental para garantir o uso seguro e eficiente do esgoto doméstico como recurso hídrico na agricultura. É necessário evitar problemas como a salinização do solo e a contaminação das águas subterrâneas, garantindo uma aplicação responsável e benéfica para os sistemas agrícolas.

Além disso, as análises físico-químicas da água de abastecimento, provenientes da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), foram realizadas em amostras retiradas diretamente da torneira, com a coleta realizada no Açude Epitácio Pessoa, localizado no município de Boqueirão, PB. Essas amostras também foram levadas para o laboratório da Extrabes para análises complementares (SILVA, 2019).

Tabela 4. Caracterização da água convencional utilizada na irrigação da área experimental.

pH	CE	N	P	COT	Na^+	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Cl^-
-	$dS\ m^{-1}$	---------- mg L^{-1} ----------							-
7,5	0,78	0,26	1,65	1,71	9,1	5,2	11,1	6,2	175

pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; N: Nitrogênio total; P: Fósforo; COT: Carbono orgânico total; Na^+: Sódio, K^+: Potássio; Ca^{+2}: Cálcio; Mg^{+2}: Magnésio; Cl^-: Cloro.

Fonte: Silva, 2019.

A qualidade da água utilizada na irrigação é fundamental para o desenvolvimento das plantas, pois influencia diretamente o crescimento e a produtividade das culturas. A Tabela 4 apresenta dados sobre parâmetros importantes da água da área experimental, como o pH, a condutividade elétrica (CE), os nutrientes e os cátions presentes, elementos essenciais para avaliar os efeitos da água no solo e na saúde das plantas.

O pH da água, que foi registrado em 7,5, indica que ela é ligeiramente alcalina. O pH ideal para a maioria das plantas de cultivo varia entre 6 e 8, e valores fora dessa faixa podem prejudicar a absorção de nutrientes essenciais. Marschner (2012) aponta que o pH afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes no solo, podendo tornar certos elementos, como ferro e manganês, menos solúveis e, portanto, menos disponíveis para as plantas.

A condutividade elétrica (CE), que mede a concentração de sais na água, foi de 0,78 dS m^{-1}. Este valor indica a presença de sais dissolvidos, mas não é elevado o suficiente para representar riscos imediatos à irrigação. De acordo com Richards (1954), uma CE superior a 1,5 dS m^{-1} pode começar a afetar o desenvolvimento das plantas, especialmente em solos com baixa drenagem. Portanto, a CE de 0,78 dS m^{-1} parece estar dentro de limites adequados para o cultivo.

Em relação aos nutrientes presentes, os valores de nitrogênio (0,26 mg L^{-1}), fósforo (1,65 mg L^{-1}), potássio (5,2 mg L^{-1}), cálcio (11,1 mg L^{-1}) e magnésio (6,2 mg L^{-1}) indicam uma água com potencial nutritivo, mas que pode exigir suplementação para garantir o crescimento ideal das plantas. O nitrogênio, essencial para o desenvolvimento vegetativo, encontra-se em uma concentração

baixa, o que pode exigir a adição de fertilizantes nitrogenados (Malavolta et al., 1997). O fósforo é importante para o desenvolvimento radicular e formação de flores e frutos, e pode ser limitante em águas com baixa concentração desse nutriente (Fageria et al., 2009). Potássio e cálcio estão em níveis favoráveis para a fotossíntese, resistência a doenças e estrutura celular (Marschner, 2012), e o magnésio é relevante para a clorofila e fotossíntese.

No entanto, a presença de sódio (Na^+) e cloro (Cl^-) em concentrações de 9,1 mg L^{-1} e 175 mg L^{-1}, respectivamente, é motivo de preocupação. O sódio pode causar a sodificação do solo, impactando a drenagem e absorção de nutrientes pelas raízes (Rengasamy, 2010). O cloro, por sua vez, pode ser tóxico em altas concentrações, afetando o metabolismo das plantas e sua resistência a condições de estresse, como seca e salinidade (Zeng *et al*., 2002).

Portanto, embora a água com essas características seja adequada para o cultivo de várias culturas, é necessário um monitoramento constante. Em alguns casos, será preciso corrigir os níveis de nutrientes ou adotar estratégias de drenagem para otimizar o desenvolvimento das plantas e preservar a saúde do solo.

O cultivo do mamoeiro no Estado do Espírito Santo, por exemplo, é realizado em solos conhecidos como tabuleiros costeiros, que são arenosos, com baixos teores de matéria orgânica e pobres em nutrientes. A adição de matéria orgânica é fundamental para promover altas produtividades (INCAPER, 2011) (Figura 12).

Em sistemas agroflorestais, como evidenciado por estudos com o uso de águas residuais, a avaliação do crescimento de espécies florestais pode ser feita por métodos não destrutivos, como a medição da altura e diâmetro do caule. Essas abordagens permitem a análise das influências ambientais, genéticas e agronômicas no crescimento das plantas (Araujo *et al*., 2014; Alves *et al*., 2015). Esse tipo de estudo tem sido realizado para entender o efeito do uso de água de esgoto doméstico tratada no crescimento de arbóreas.

Independentemente dos tratamentos aplicados no experimento: T1: Irrigação com volume de 500 ml planta/semana com água de abastecimento; T2: Irrigação com volume de 500 ml planta/semana e T3: Irrigação com volume de

1000 ml planta/semana de água residuária de esgoto doméstico. As variáveis altura e diâmetro a altura do peito (DAP), das espécies não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos com água residuária e água de abastecimento (Magalhães *et al*., 2019).

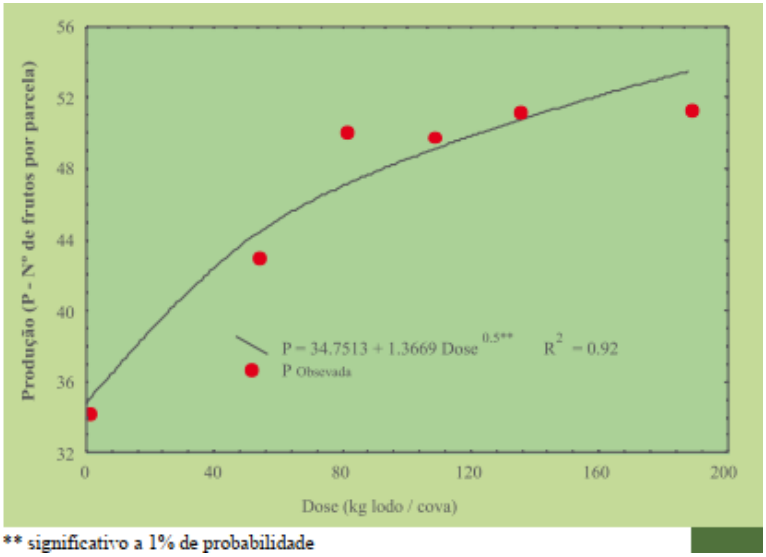

Figura 12. Representação gráfica do modelo de regressão para a produção do mamoeiro em função da dose de lodo higienizado com cal virgem.

A Figura 13 ilustra o crescimento em altura de *Mimosa caesalpinifolia* e mostra como as diferentes condições experimentais, como variações na irrigação ou fertilização, influenciam o desenvolvimento dessa espécie ao longo dos dias após o plantio (DAP). As linhas no gráfico representam os diferentes tratamentos: a equação de regressão associada permite prever a altura das plantas ao longo do tempo, sendo o valor de R^2 uma medida da precisão do modelo (SILVA; PEREIRA, 2023).

Na Figura 14, o foco está em *Myracrodruon urundeuva Allemão*, com uma abordagem similar à anterior.

O gráfico demonstra como os tratamentos afetam o crescimento em altura dessa espécie. A equação de regressão também é apresentada para entender melhor a dinâmica de crescimento, e o valor de R^2 ajuda a avaliar a adequação do modelo às observações (Silva; Pereira, 2023).

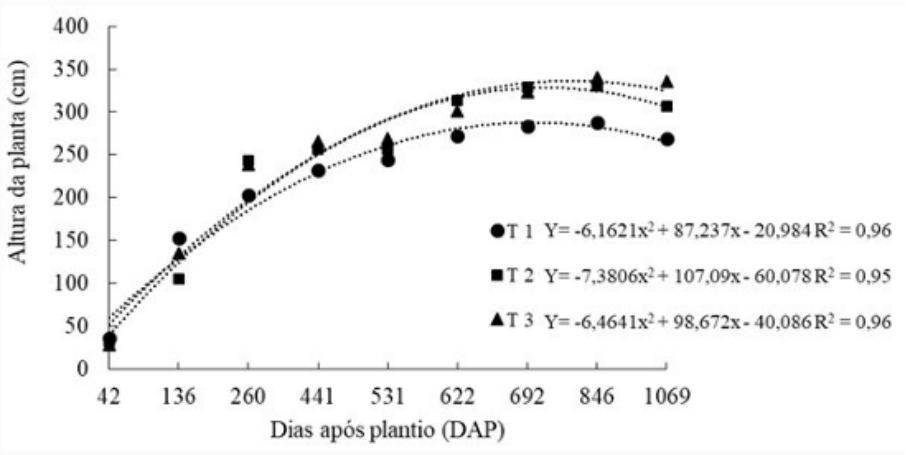

Figura 13. Curva de crescimento em altura de *Mimosa ceasalpinifolea* Benth. Fonte: Silva e Pereira, 2023.

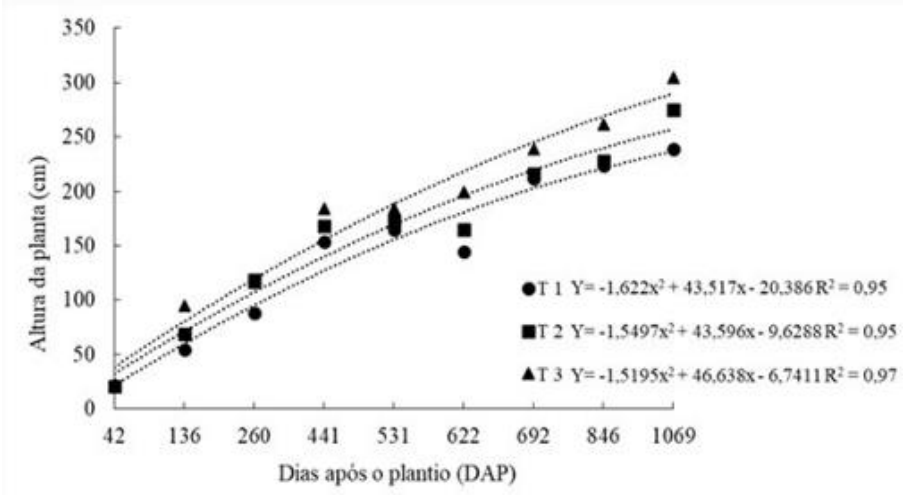

Figura 14. Curva de crescimento em altura de *Myracrodruon urundeuva* Allemão. Fonte: SILVA; PEREIRA, 2023.

A Figura 15 apresenta o crescimento em diâmetro do caule de *Mimosa caesalpinifolia Benth*. Novamente, as linhas no gráfico representam as diferentes condições experimentais, e a equação de regressão fornece informações sobre a relação entre o tratamento e o aumento do diâmetro do caule ao longo do tempo. O valor de R^2 é fundamental para entender o ajuste do modelo aos dados obtidos.

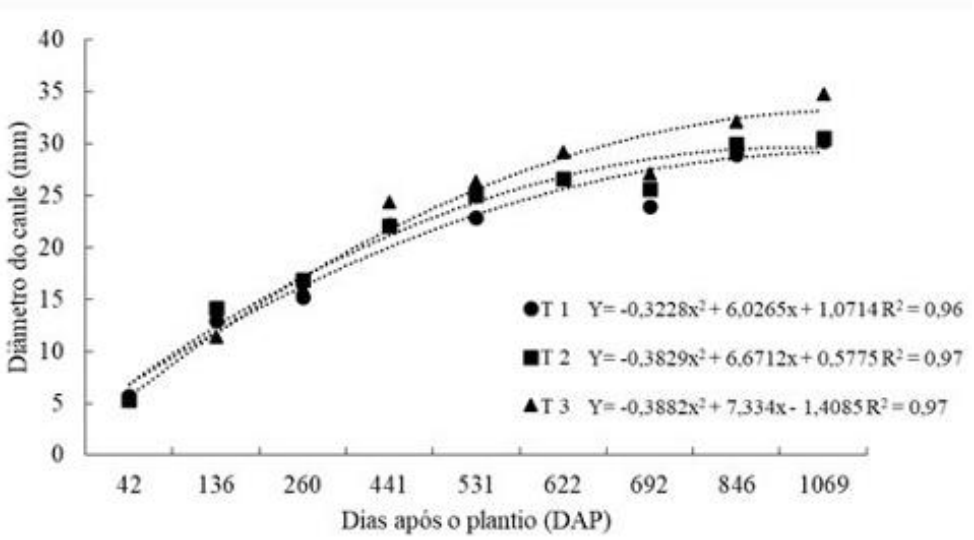

Figura 15. Curva de crescimento em diâmetro caulinar de *Mimosa ceasalpinifolea* Benth. Fonte: Silva e Pereira, 2023.

Por fim, a Figura 16 mostra o crescimento em diâmetro do caule de *Myracrodruon urundeuva* Allemão. Assim como nas Figuras 12 a 15, as linhas representam os efeitos dos tratamentos ao longo do tempo, e a análise estatística através da equação e do valor de R² oferece uma visão precisa sobre o desenvolvimento do caule.

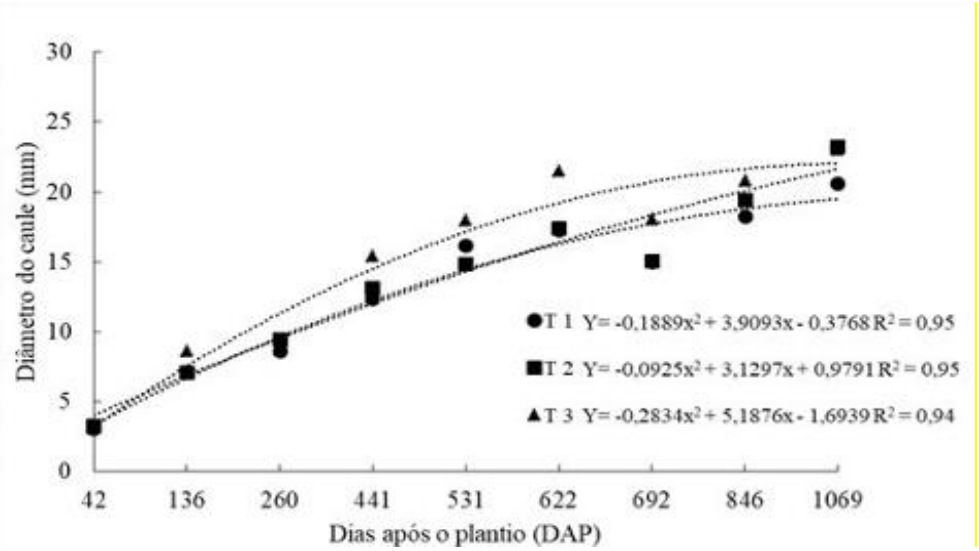

Figura 16. Curva de crescimento em diâmetro caulinar de *Myracrodruon urundeuva Allemão*. Fonte: Santos, 2016.

Essas Figuras e suas respectivas equações de regressão permitem uma análise detalhada de como as espécies respondem aos diferentes tratamentos ao longo do tempo, contribuindo para o entendimento das dinâmicas de crescimento. Esses modelos matemáticos são essenciais para formular práticas agrícolas e florestais mais eficazes, oferecendo informações sobre a melhor forma de manejar essas espécies para obter o melhor desempenho em altura e diâmetro do caule.

Os resultados apresentados indicam que as plantas cultivadas com água residuária demonstraram melhor desenvolvimento, atribuído à incorporação do esgoto doméstico tratado no solo. Esse processo aumenta a disponibilidade de nutrientes e a matéria orgânica, favorecendo o crescimento das plantas. Conforme Santos (2016), a utilização de água residuária rica em matéria orgânica é uma alternativa viável aos fertilizantes convencionais, podendo ser aplicada em sistemas agroflorestais, silvicultura e agricultura, promovendo melhorias no crescimento de espécies arbóreas.

Em um estudo conduzido entre agosto e dezembro de 2013, no viveiro do Departamento de Silvicultura da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), foram avaliadas diferentes proporções de biossólido como componente de substratos para a produção de mudas em sacos plásticos de três espécies florestais da Mata Atlântica. Além de aspectos morfológicos, analisaram-se o peso, a facilidade de transporte das mudas e seu desenvolvimento em campo (Cabreira, 2017). A Tabela 5 apresenta os resultados desse experimento, evidenciando a influência positiva do biossólido no desenvolvimento das mudas, destacando-se como uma solução sustentável para a produção florestal.

De maneira geral, observa-se que, no momento da expedição para o campo, as mudas cultivadas em substrato com 80% de biossólido apresentaram crescimento superior em comparação aos demais substratos. Por outro lado, as mudas produzidas com esterco mostraram valores médios de crescimento significativamente inferiores. Esse comportamento pode ser explicado pelos teores mais elevados de matéria orgânica e nutrientes (exceto potássio) presentes no substrato com alta proporção de biossólido.

Tabela 5. Valores médios de variáveis de crescimento de mudas das três espécies florestais produzidas em diferentes substratos, na época de expedição para o campo

Espécie	Parâmetro	Tratamento			
		40:50:10*	20:70:10**	40:50:10**	80:10:10**
Peltophorobium dubim (Farinha seca)	Diâmetro (mm)	4,6 c	4,8 c	6,3 b	7,7 a
	Massa seca raiz (g)	3,64 b	3,42 b	4,03 b	5,18 a
	Massa seca aéreo (g)	6,31 c	6,92 b	11,27 a	18,85 a
	Área foliar (cm^2)	206,6 c	287,3 bc	434,8 b	917,6 a
	IQD	1,37b	1,31b	1,63b	2,37a
Lafoensia pacari (Dedaleiro)	Diâmetro (mm)	3,6 b	4,8 a	4,9 a	5,4 a
	Massa seca Raiz (g)	2,88 b	3,17 a	3,21 a	3,21 a
	Massa seca Aéreo (g)	4,52 b	8,05 a	8,00 a	9,04 a
	Área foliar (cm^2)	178,7 b	457,3 a	473,9 a	577,3 a
	IQD	0,60b	0,77ab	0,76ab	0,84a
Ceiba speciosa (Paineira)	Diâmetro (mm)	6,7 b	6,2 b	7,4 ab	8,4 a
	Massa seca raiz (g)	3,72 b	3,20 b	3,64 b	4,76 a
	Massa seca aéreo (g)	5,54 b	5,04 b	7,51 a	8,84 a
	Área foliar (cm^2)	177,7 c	147,5 c	366,5 b	483,5 a
	IQD	1,47a	1,35a	1,43a	1,84a

Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($P \geq 0,95$).
*Proporções volumétricas, em sequência, de esterco bovino, solo argiloso e areia;
**Proporções volumétricas, em sequência de biossólido; solo argiloso e areia.

Fonte. Cabreira, 2017.

Segundo Faustino *et al*. (2005), o aumento da matéria orgânica no substrato está diretamente relacionado ao incremento em altura das mudas. Estudos corroboram que substratos ricos em matéria orgânica promovem melhor desenvolvimento do sistema radicular e um balanço nutricional mais equilibrado (Caldeira *et al*., 2007), o que está de acordo com os resultados apresentados neste estudo.

A utilização de resíduos de esgoto como componente de substratos tem sido cada vez mais explorada na literatura científica. A quantidade de publicações sobre o tema apresentou um crescimento significativo a partir de 2010, com algumas exceções, como os anos de 2011, onde não foram encontrados trabalhos, e de 2016, com apenas um artigo publicado. O ano de 2013 destacou-se como o período de maior produção científica, com nove artigos publicados, representando 13,8% do total analisado (Silva; Pereira, 2023) (Figura 17).

Esses dados reforçam a relevância do uso de resíduos de esgoto na produção agrícola e florestal, destacando a necessidade de mais estudos para

aprimorar as técnicas e garantir a segurança e eficiência desse recurso sustentável.

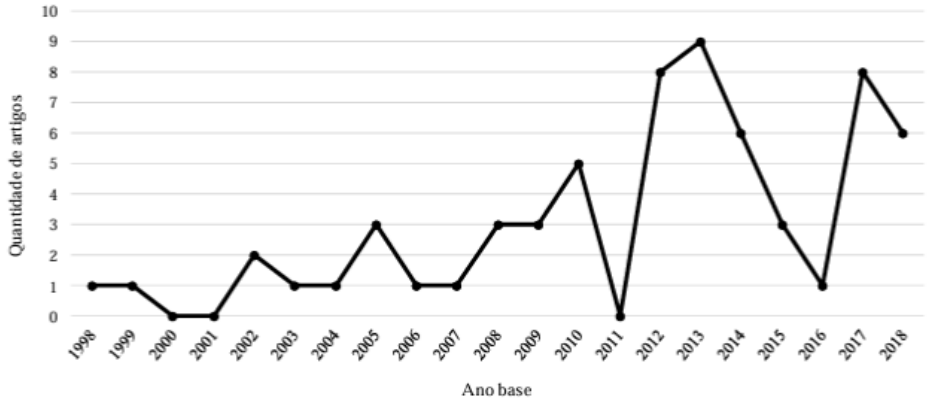

Figura 17. Quantidade de trabalhos publicados de 1998 a 2018 sobre o uso de resíduo sólido do tratamento de esgoto na produção de mudas de espécies arbóreas. Fonte: Silva e Pereira, 2023.

Um estudo realizado na Universidade Federal de Uberlândia, em Minas Gerais, avaliou o impacto de diferentes proporções de biossólido na composição do substrato utilizado para o cultivo de mudas de *Eucalyptus citriodora*. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando delineamento em blocos casualizados, com cinco tratamentos (0%, 5%, 10%, 15% e 20% de biossólido) e quatro repetições. O biossólido utilizado foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto Aclimação, administrada pelo Departamento Municipal de Águas e Esgoto de Uberlândia.

As sementes foram cultivadas em tubetes de 290 cm³ e submetidas à irrigação diária. Após 120 dias, foram avaliados os parâmetros de altura e diâmetro de colo das mudas. A análise estatística foi realizada utilizando o *software* SISVAR, e os resultados indicaram significância ao nível de 0,05 pelo teste de F para ambos os parâmetros.

- **Resultados do Estudo**

1. **Altura das Plantas**: O uso de biossólido no substrato promoveu um crescimento linear na altura das mudas, conforme a equação y=1,3562x+22,191y = 1,3562x + 22,191y=1,3562x+22,191

(R2=0,9296R^2 = 0,9296R2=0,9296). Esse aumento é atribuído ao fornecimento de nitrogênio (4,0%) e fósforo (2,1%) pelo biossólido, nutrientes essenciais no estágio inicial do desenvolvimento do eucalipto.

2. **Diâmetro de Colo**: Foi observado um aumento significativo no diâmetro de colo com o incremento da concentração de biossólido no substrato, conforme a equação y=0,0829x+1,713y = 0,0829x + 1,713y=0,0829x+1,713 (R2=0,9447R^2 = 0,9447R2=0,9447). A cada 1% de aumento na proporção de biossólido, houve um acréscimo de 0,083 cm no diâmetro das mudas.

Esses resultados evidenciam o potencial do biossólido como componente do substrato para a formação de mudas de *Eucalyptus citriodora*, promovendo um desenvolvimento significativo.

- **Estudos Correlatos no Brasil**

No contexto da produção de eucaliptos no Brasil, o uso de biossólido também tem mostrado resultados promissores. Gonçalves *et al*. (2000) reportaram um aumento de 37% na produtividade de eucaliptos com a aplicação de 10 t ha^{-1} de biossólido misturado com fósforo, comparado à adubação química convencional, aos 22 meses de idade.

- **Representações Gráficas**

As Figuras 18, 19 e 20 (citadas anteriormente) ilustram o efeito das doses crescentes de lodo de esgoto, nas formas úmida e seca, no crescimento em altura das mudas. Esses gráficos reforçam a efetividade do biossólido como alternativa sustentável para melhorar o desenvolvimento de espécies florestais.

O estudo destaca o uso do biossólido como uma prática sustentável e eficiente, promovendo a economia de insumos químicos e o reaproveitamento de resíduos. Isso o torna uma ferramenta valiosa para a silvicultura e a agricultura, em consonância com os princípios de sustentabilidade.

Figura 18. Parcela de *Eucalyptus grandis* do tratamento testemunha, aos três meses de idade. Fonte: Caldeira *et al*., 2012.

Figura 19. Parcela de *Eucalyptus grandis* do tratamento com 10 toneladas de lodo aos esgotos por hectare, aos três meses de idade. Fonte: Caldeira *et al*., 2012.

A Figura 20 destaca o crescimento em altura de árvores de *Eucalyptus grandis* submetidas a diferentes doses de lodo seco (10, 20 e 30 t ha^{-1}) em comparação a uma testemunha (sem aplicação de lodo). O gráfico evidencia que o uso de lodo seco promoveu um crescimento superior em relação ao grupo controle, demonstrando uma relação direta entre a dose aplicada e o desenvolvimento das árvores (Caldeira *et al*., 2012).

➢ **Observações do Gráfico:**

1. **Testemunha (0 t ha⁻¹)**: As árvores que não receberam lodo seco apresentaram o menor crescimento ao longo do tempo, refletindo a ausência de suplementação nutricional fornecida pelo lodo.
2. **Doses Crescentes de Lodo Seco**:
   - **10 t ha⁻¹**: Proporcionou um crescimento intermediário, superior à testemunha, mas inferior às doses mais altas.
   - **20 t ha⁻¹**: Mostrou um crescimento significativo, indicando uma melhoria expressiva nas condições para o desenvolvimento das árvores.
   - **30 t ha⁻¹**: Resultou no maior crescimento observado, sugerindo que o aumento na disponibilidade de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, está diretamente relacionado à dose aplicada.

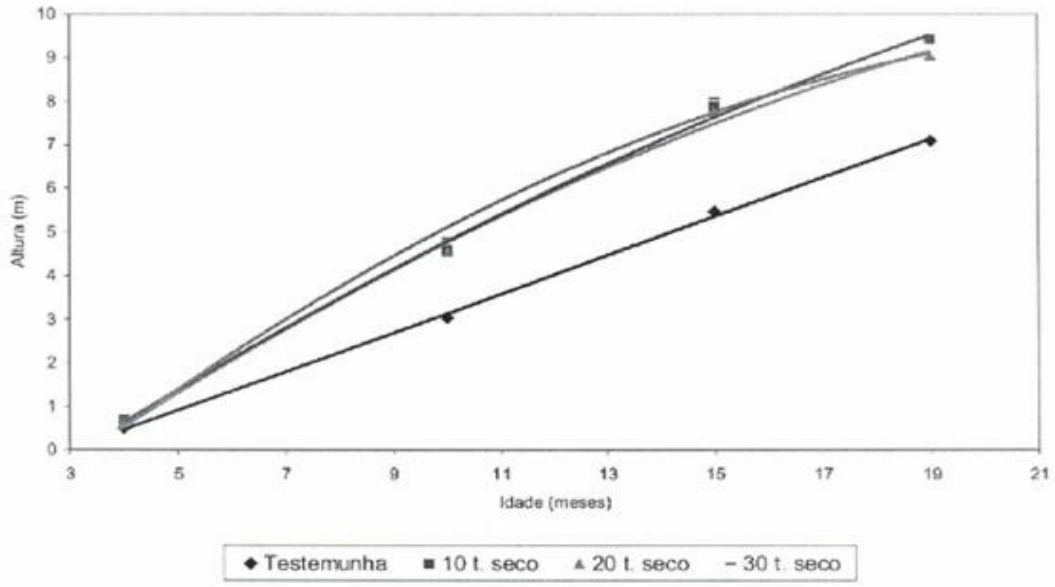

Figura 20. Crescimento em altura das árvores de *Eucalyptus grandis* tratadas com doses crescentes de lodo seco. Fonte: Caldeira *et al*., 2012.

➢ **Análise Geral:**

Os resultados refletem o papel positivo do lodo seco como uma fonte rica em nutrientes que promove o crescimento das árvores. O comportamento observado reforça que o uso de doses crescentes de lodo seco melhora significativamente o desenvolvimento em altura de *Eucalyptus grandis*, sendo

uma alternativa viável para substituir ou complementar práticas de adubação tradicional.

Esses achados corroboram a eficácia do lodo seco como insumo sustentável, alinhado com a busca por práticas que promovam produtividade e reaproveitamento de resíduos.

O estado do Espírito Santo apresenta grande potencial para a reutilização de biossólidos, especialmente nas áreas voltadas à produção florestal, recuperação de solos degradados e desenvolvimento de práticas agrícolas sustentáveis. O mapeamento realizado indicou regiões estratégicas onde o lodo de esgoto/biossólido pode ser aplicado de forma segura e eficiente, destacando os municípios de Aracruz e Alegre como áreas promissoras para essa prática.

- **Análise das Potencialidades:**

1. **Aracruz**:
   - Município com grande área de cultivo florestal, notadamente de eucalipto, onde a aplicação de biossólidos pode aumentar a produtividade e promover melhorias na qualidade do solo.
   - A integração de biossólidos ao manejo agrícola local pode contribuir para a sustentabilidade das plantações e reduzir a dependência de insumos químicos.
2. **Alegre**:
   - Reconhecido pelo forte potencial agrícola, incluindo a recuperação de solos degradados e a implantação de Sistemas Agroflorestais (SAFs).
   - A aplicação de biossólidos nesse município poderia melhorar a fertilidade do solo, aumentar a matéria orgânica e promover o desenvolvimento sustentável de sistemas de produção.

- **Benefícios da Reutilização de Biossólidos:**

- **Recuperação Ambiental**: Melhoria da estrutura e da fertilidade do solo em áreas degradadas.

- **Agricultura Sustentável**: Substituição parcial ou total de fertilizantes químicos por um insumo orgânico rico em nutrientes.
- **Redução de Resíduos**: Destinação eficiente do lodo de esgoto, evitando seu descarte inadequado e promovendo a economia circular.

A Figura 21, correspondente ao mapeamento das áreas potenciais, reforça o compromisso do Espírito Santo com práticas inovadoras e sustentáveis, contribuindo para a gestão eficiente de resíduos e o fortalecimento da agricultura e da silvicultura no estado.

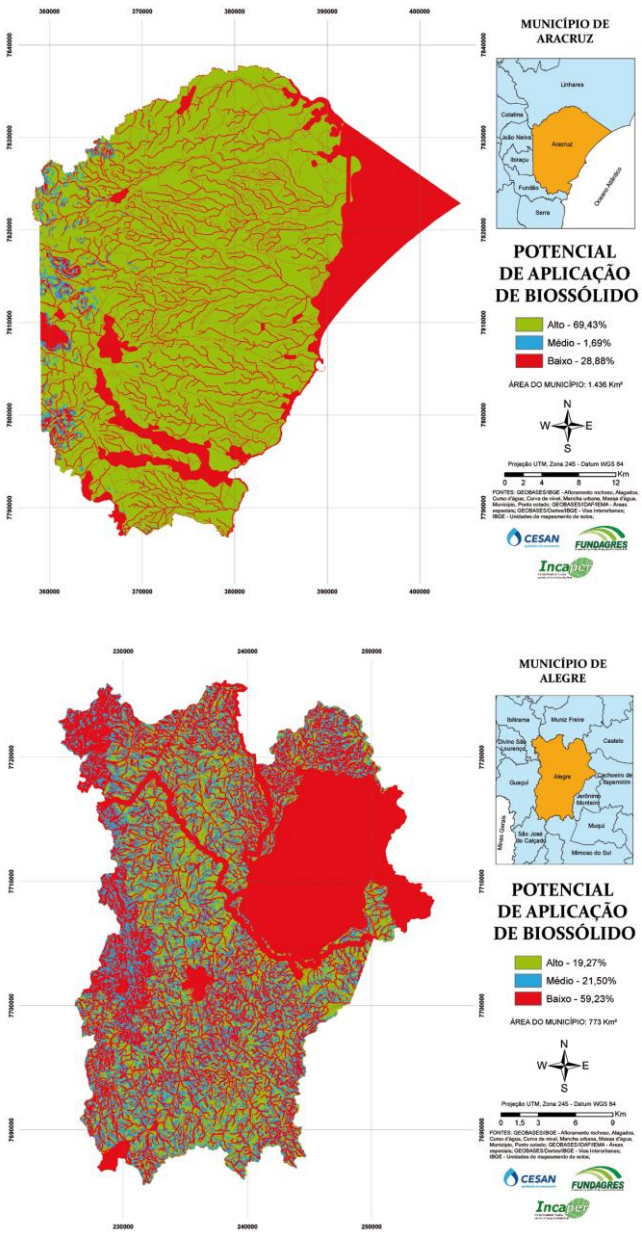

Figura 21. Potencial de aplicação de biossólido em Municípios do ES. Fonte: Incaper, 2023.

Assim, a utilização de biossólidos em áreas agroflorestais desponta como uma das alternativas mais promissoras para a disposição final adequada dos resíduos provenientes das estações de tratamento de esgoto. Essa prática permite o aproveitamento do potencial dos biossólidos como fertilizante e condicionador de solos, promovendo a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Além disso, a aplicação de biossólidos contribui diretamente para o desenvolvimento de mudas de árvores, sendo particularmente benéfica em sistemas agroflorestais, onde a integração de espécies florestais e agrícolas é essencial para a recuperação ambiental e o aumento da produtividade. Essa estratégia não só reduz a necessidade de insumos químicos, mas também promove a sustentabilidade e a economia circular, transformando resíduos em recursos valiosos para o manejo do solo e a produção florestal.

7. Considerações

A utilização de resíduos provenientes de estações de tratamento de esgoto em sistemas agroecológicos apresenta-se como uma solução inovadora e sustentável para a recuperação e manutenção da fertilidade do solo. Essa prática, ao reaproveitar um recurso amplamente disponível, contribui para a economia circular, reduzindo os impactos ambientais associados ao descarte inadequado e promovendo a reutilização eficiente de nutrientes.

Entre suas principais aplicações, destacam-se os sistemas agroflorestais, a produção de mudas em viveiros e as práticas silviculturais, onde os biossólidos podem atuar como condicionadores do solo, enriquecendo-o com nutrientes essenciais para o crescimento das plantas, como nitrogênio e fósforo. Além disso, sua aplicação melhora as propriedades do solo, como o teor de matéria orgânica, a capacidade de retenção de água e a redução da necessidade de fertilizantes químicos, o que minimiza os custos de produção e os impactos ambientais.

Apesar dos benefícios evidentes, é fundamental considerar as questões legais e os cuidados necessários para a utilização segura de biossólidos. A legislação vigente no Brasil, como a Resolução CONAMA nº 375/2006,

estabelece critérios rigorosos para o uso de lodo de esgoto na agricultura, incluindo limites para metais pesados, patógenos e contaminantes emergentes, como resíduos farmacêuticos e microplásticos. O cumprimento dessas normas é essencial para evitar riscos à saúde pública e ao meio ambiente, já que o manejo inadequado pode levar à contaminação do solo, das águas subterrâneas e à dispersão de toxinas, comprometendo os benefícios esperados.

Nesse contexto, é imprescindível o investimento em pesquisas científicas que aprofundem o conhecimento sobre o potencial dos biossólidos e aprimorem os processos de tratamento e aplicação. Além disso, a capacitação de agricultores em boas práticas de manejo e a promoção de parcerias estratégicas entre produtores rurais, instituições de pesquisa e órgãos reguladores são ações fundamentais para garantir a segurança e a eficácia dessa tecnologia.

Quando devidamente tratado e manejado, o resíduo de esgoto apresenta vantagens competitivas, como a redução da dependência de insumos externos, a melhoria da qualidade do solo e o aumento da produtividade agrícola, alinhando-se aos princípios da agroecologia e ao desenvolvimento sustentável.

Portanto, o uso de resíduos de esgoto em sistemas agroecológicos representa uma oportunidade única para impulsionar a sustentabilidade no setor agrícola. Essa prática não apenas recupera solos degradados, mas também contribui para a transição a um modelo agrícola mais resiliente e ecologicamente equilibrado. A integração entre ciência, políticas públicas e práticas agrícolas responsáveis é essencial para consolidar essa abordagem como uma alternativa viável, capaz de atender aos desafios do século XXI e promover um futuro mais sustentável.

8. Referências

ABNT NBR 10004 (2004). **Resíduos Sólidos – Classificação**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABREU, A. H. M. **Biossólido na produção de mudas florestais**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 79. 2014.

ALVES, G. S.; TARTAGLIA, F. L.; FERREIRA, M. M.; BEUTLER, A. N.; SANTOS, E. C. Análise de crescimento da mamoneira BRS energia em função da densidade populacional. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 167-175, 2015.

ANDRADE, C. A.; SILVA, J. F.; MARTINS, M. S. Uso de biossólidos como fertilizante orgânico em solos agrícolas: benefícios e desafios. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. 1-12, 2020.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Sistemas de Tratamento de Esgoto:** Lagoas de Estabilização. Belo Horizonte: DESA/UFMG. 2006.

ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Alternativas de uso de resíduos do saneamento.** Rio de Janeiro: ABES, 2006.

ARAÚJO, A. C.; ALOUFA, M. A. I., SILVA, A. J. N., COSTA, A. A., SANTOS, I. S. Análise não destrutiva de crescimento do gergelim consorciado com feijão caupi em sistema orgânico de cultivo. **Revista Brasileira de Agroecologia**, n. 9, p. 259-268, 2014.

BERNARDES, R. F. B. **Água residuária de suínos em um sistema agroflorestal**: atributos químicos e translocação de nutrientes no solo. 76 f. (Dissertação - Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Uberlândia – MG, 2017.

CABREIRA, G. V.; GONÇALVES, R. S.; BELLINASO, H.; CABRAL, P. R.; FREITAS, T. C. S.; MOREIRA, V. F.; ARAÚJO, A. T. S.; SANTOS, A. F.; CARON, B. O. Biossólido como componente de substrato para produção de mudas florestais. **Floresta**, v. 47, n. 2, p. 165-176, 2017.

CALDEIRA, M. V. W.; MARCOLIN, M.; MORAES, E.; SCHAADT, S. S. Influência do resíduo da indústria do algodão na formulação de substrato para produção de mudas de *Schinus terebinthifolius* Raddi, *Archontophoenix alexandrae* Wendl. et DRUDE E *Archontophoenix cunninghamiana* Wendl. et Drude. **Ambiência**, Guarapuava, v. 3, n. 3, p. 311-323, 2007.

CESAN. Companhia Espírito-Santense de Saneamento. **Apostila tratamento de esgoto**. 2013. Disponível em: https:// www.cesan.com.br/wp-content/uploads/2020/08/apostila_tratamento_esgoto.pdf. Acesso em: 13 jun. 2024.

CHANG, C.; XU, G.; LIANG, S. Impact of biosolids on soil health and crop productivity: a meta-analysis. **Agricultural Sciences**, v. 56, p. 123-138, 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**: princípios do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: DESA/UFMG. 2007.

CONAMA **aprova norma sobre uso de lodo de esgoto na agricultura**. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/conama-aprova-norma-sobre-uso-de-lodo-de-esgoto-na-agricultura. Acesso em: 15 jun. 2024.

CONAMA. **Resolução nº 375/2006**. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Brasil.

COSTA, A. N. da; COSTA, A. de F. S. (Org.). **Manual de uso agrícola e disposição do lodo de esgoto para o estado do Espírito Santo**. Vitória: Incaper, 2011.

FAUSTINO, R.; KATO, M. T.; FLORÊNCIO, L.; GAVAZZA, S. Lodo de esgoto como substrato na produção de *Senna siamea*. Lam. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, p. 278-282, 2005.

FONSECA, R. M.; OLIVEIRA, J. A.; SOARES, A. C. Uso sustentável de águas residuais na agricultura: vantagens e desafios. **Agricultura Sustentável**, Brasília, v. 8, n. 2, p. 45-53, 2018.

GONÇALVES, J. L. M.; SANTARELLI, E. G.; MORAES NETO, S. P.; MANARA, M. P. Produção de mudas de espécies nativas: substrato, nutrição, sombreamento e fertilização. In: GONÇALVES, J. L. M.; BENEDETTI, V.; Ed. **Nutrição e fertilização florestal.** Piracicaba: IPEF, 2000, p.309-350.

KELLER, J.; HARTLEY, K.; YOUNG, B. Biosolids application in agriculture: strategies for safe and sustainable use. **Environmental Management Journal**, v. 49, p. 327-342, 2012.

KÖRDEL, W. et al. **Environmental effects of biosolids application**. 2012.

LAL, R. Soil health and climate change: An imperative for transformative solutions. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 75, n. 3, p. 47-56, 2020.

LIMA, L. B. *et al*. **Aplicação de biossólidos na agricultura**: riscos e benefícios. 2014.

MAGALHÃES, A. G.; SOUSA MEDEIROS, S. de. **Análise não destrutiva de crescimento de arbóreas cultivadas com água residuária.**

MARTINS, L. F.; SILVA, P. R.; SANTOS, T. C. Potencial de biossólidos no sequestro de carbono e manejo de solos tropicais. **Ciência e Sustentabilidade**, v. 5, n. 3, p. 45-60, 2021.

MEDEIROS, S. S.; LIMA, V. L. A.; SILVA, J. D. Irrigação com água residuária: efeitos no solo e na produção agrícola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 7, p. 708-714, 2010.

MELO, E. L.; GONÇALVES, G. M.; FERREIRA, P. H. Saneamento Básico e Sustentabilidade: Biogás e Biofertilizantes Provenientes de ETEs. **Revista Ambiente & Água**, v. 13, n. 2, p. 234-245, 2018.

MELO, V. F.; MONTANARI, R. Reciclagem de resíduos orgânicos: impactos na qualidade do solo e sustentabilidade agrícola. **Agroecologia em Foco**, v. 3, n. 2, p. 56-68, 2020.

MESSIAS, A. S.; SILVA, H. A. E.; LIMA, V. N.; SOUZA, J. E. G. de. Avaliação da mobilidade de micronutrientes em solo tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**. v. 3, n. 3, p. 193-211, 2007. https://doi.org/10.54399/rbgdr.v3i3.93.

TCHOBANOGLIOUS, G.; STENSEL, H.; TSUCHIHASHI, R.; BURTON, F. **Wastewater engineering**: treatment and resource recovery. 5. ed. New York: Metcalf & Eddy, Inc., 2014.

PAZ-FERREIRO, J. et al. The Use of Sewage Sludge as a Fertilizer: Risks and Benefits. **Applied Soil Ecology**, v. 129, p. 45-55, 2018.

PAZ-FERREIRO, J.; NIETO, A.; MÉNDEZ, A.; ASKELAND, M.; GASCÓ, G. Biochar from biosolids pyrolysis: A review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 15, n. 5, p. 956, 2018.

RIBEIRO, A. R. *et al*. **Utilização de biossólidos na agricultura:** uma análise crítica. 2006.

SANTOS, F. E. V.; KUNZ, S. H.; CALDEIRA, M. V. W.; AZEVEDO, C. H. S.; RANGEL, O. J. P. Características químicas de substratos formulados com lodo de esgoto para produção de mudas florestais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 18, n. 9, p. 971-979, 2014.

SANTOS, R. C. **Avaliação nutricional e de crescimento inicial em altura de espécies arbóreas em sistemas agroflorestais na região de Itaparica**. 97f. (Tese – Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Ciência Florestal, Recife, 2016.

SILVA, A. M. F.; OLIVEIRA, M. L. S.; CARVALHO, C. S. (2016). Avaliação da Contaminação de Solos por Metais Pesados em Áreas Agrícolas. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 1, p. 45-53.

SILVA, J. R.; PEREIRA, M. T. Crescimento em altura de *Mimosa caesalpinifolia* sob diferentes condições experimentais de irrigação e fertilização. **Revista Brasileira de Ecologia**, v. 40, n. 2, p. 123-135, 2023.

SILVA, M. T.; ALVES, A. L. Impactos do uso de esgoto doméstico tratado na irrigação de culturas agrícolas. **Engenharia Ambiental**: Pesquisa e Tecnologia, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 123-129, 2015.

SILVA, S. S. da *et al*. **Recuperação de área degradada no Semiárido Brasileiro utilizando água residuária num sistema agroflorestal**. 2019.

FERREIRA JÚNIOR, D. C.; SILVA, M. F.; LANDIM, T. N.; CAMARGO, R.; MALDONADO, A. C. D. **Uso do biossólido na formação de mudas de eucalipto**. Disponível em: https://www.eventossolos.org.br/fertbio2014/anais/arquivos_anais/652.Image.Marked.pdf. Acesso em: 17 jun. 2024.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: Editora UFMG. 2020.

YU, H.; ZOU, W.; CHEN, J.; CHEN, H.; YU, Z.; HUANG, J.; TANG, H.; WEI, X.; GAO, B. Biochar amendment improves crop production in problem soils: A review. **Journal of Environmental Management**, n. 232, p. 8-21, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.117.