

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LARISSA FREIRE JUSTO

DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA PRODUÇÃO DE CELULOSE E PAPEL
COMO FERTILIZANTE ORGÂNICO E CORRETIVO DE SOLO: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA DE LITERATURA

CURITIBA

2023

LARISSA FREIRE JUSTO

DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA PRODUÇÃO DE CELULOSE E PAPEL
COMO FERTILIZANTE ORGÂNICO E CORRETIVO DE SOLO: UMA REVISÃO
SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de MBA em Projetos Sustentáveis e Inovações Ambientais do Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista.

Orientador: prof. Dr. Luiz Carlos de Faria.

CURITIBA

2023

DESTINAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA PRODUÇÃO DE CELULOSE E PAPEL COMO FERTILIZANTE ORGÂNICO E CORRETIVO DE SOLO: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Larissa Freire Justo

RESUMO

A disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários é um grande desafio para o setor de celulose e papel, e sua aplicação no solo tem apresentado potencial para mudança deste cenário. Assim, este trabalho objetivou levantar dados e referências de artigos através de uma Revisão Sistemática de Literatura de acordo com o Protocolo PRISMA. De forma geral, foram identificados diversos benefícios, como o aumento da fertilidade e controle da acidez do solo através da aplicação de lodo de ETE, resíduos da recuperação do licor verde e cinzas de biomassa, e os teores de metais tóxicos se mantiveram abaixo dos limites da legislação. Em relação aos aspectos econômicos, não foram encontrados trabalhos conclusivos, sendo necessário o desenvolvimento de um estudo robusto para comprovação da viabilidade econômica desta aplicação.

Palavras-Chave: resíduos sólidos industriais; fertilizantes; corretivos de solo.

ABSTRACT

Industrial solid residues landfilling consists on a challenging aspect for the pulp and paper production sector, and their use as fertilizers and soil correctives has presented potential as a new destination alternative. Thus, this article had the objective of gathering data and references from previous studies through a Systematic Literature Review according to PRISMA Protocol. In general, several benefits of applying ETP sludge, green liquor recovery residues and biomass ashes in the field have been identified, such as soil fertility and acidity control, and toxic metals content were within the limits. Regarding economic aspects, no conclusive articles have been found, showing the importance of carrying out a complete study in order to confirm the economical feasibility of this application.

Keywords: industrial solid residues; fertilizers; soil correctives.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
2. METODOLOGIA.....	8
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	17
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19

1. INTRODUÇÃO

Em 2021, as florestas plantadas no Brasil somaram uma área de 9,9 milhões de hectares, sendo 76% correspondentes a Eucalipto, destinadas a fins comerciais. Dentre eles, o setor de celulose e papel tem apresentado um crescimento expressivo ao longo dos anos, atingindo 22,5 milhões de toneladas de polpa em 2021 (sendo 19,5 milhões correspondentes a celulose de fibra curta), o que representa um aumento de 7,4% em relação a 2020 (IBÁ, 2022). Economicamente, o setor é de grande importância para o país, sendo responsável por um recorde na receita bruta de R\$ 244,6 bilhões e empregando em torno de 3 milhões de pessoas em 2021.

Considerando a expansão e a crescente demanda da sociedade, dos mercados interno e externo e as exigências de órgãos ambientais por práticas mais sustentáveis, o setor tem criado iniciativas para gestão e controle de impactos sociais e ambientais. Além da obtenção de certificações de sustentabilidade, como o *Forest Stewardship Council* (FSC) e o *Programme for the Endorsement of Forest Certification* (PEFC), também têm sido observado neste setor investimentos em tecnologia, pesquisa e desenvolvimento visando a otimização de processos e consequente redução de desperdícios.

Neste contexto, a gestão de resíduos sólidos tem sido tema de discussões pois, além do caráter ambiental, o reuso destes materiais apresenta benefícios econômicos, conforme alguns conceitos, dentre eles o de Produção Mais Limpa (P+L), citados por Foelkel (2008):

“(...) quase tudo que vira resíduo ou poluição é matéria-prima desperdiçada, jogada fora por nós mesmos ao longo do processo industrial. Isso tem um enorme valor, primeiro como matéria-prima jogada fora; depois pelo valor desperdiçado no processo que foi a ela agregado; e finalmente, os custos de controle da poluição e de manuseio e disposição dos resíduos gerados.”

As discussões acerca da gestão de resíduos sólidos têm crescido substancialmente nas últimas décadas, o que é representado inclusive pelas movimentações na legislação brasileira. A Lei Federal nº 12.305/2010, em conjunto com seu decreto regulamentador 7.404/2010, instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual define os resíduos sólidos como “material, substância, objeto ou

bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido” (BRASIL, 2010). Complementarmente, a norma NBR 10.004 classifica os resíduos de acordo com sua periculosidade: perigosos, quando apresentam inflamabilidade, toxicidade, patogenicidade, reatividade e/ou corrosividade; e não perigosos, divididos em inertes, onde não há constituintes solubilizados em concentração superior à da potabilidade de água, e não inertes, que podem ser solúveis em água, biodegradáveis ou apresentar combustibilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2004).

A PNRS, adicionalmente, deu um novo significado à gestão de resíduos, uma vez que estabeleceu uma priorização para seu gerenciamento. Desta forma, a ordem de prioridades recomendada por essa normativa é não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e, em último caso, a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Portanto, após esgotados todos os meios para redução na geração, é importante que sejam feitas caracterizações completas dos resíduos sólidos para conhecimento de seus constituintes e sua classificação. A partir de então, deverão ser implementadas alternativas para seu reaproveitamento visando o bem-estar social e a mitigação de impactos ambientais – e quando se trata de setores industriais, dentre eles o de celulose e papel, são também levados em consideração o alinhamento à estratégia do negócio e a valoração econômica.

Com base em suas características físico-químicas, os resíduos sólidos do setor de celulose e papel, segundo levantado por Foelkel (2008), são classificados como Classe II - Não Perigosos e Não Inertes (com exceção da cal virgem e óleos e graxas, que não são objetos deste estudo). Assim, o tratamento dos mesmos para posterior aplicação na agricultura como fertilizante e corretivos de solo tem apresentado alto potencial. Além disso, eventos recentes em escala mundial, como a guerra entre Rússia e Ucrânia - sendo o primeiro um importante produtor de fertilizantes e responsável por 23% das importações do Brasil (SENAR, 2022) - impactaram o abastecimento de produtos para o solo em diversos países. Assim, este fato, em conjunto com a grande disponibilidade de áreas atualmente destinadas à agricultura e florestas plantadas no Brasil, tem conferido ainda mais importância e visibilidade a estas alternativas para

produção e abastecimento de insumos para o campo. Esta prática, portanto, além de mitigar o aterramento dos resíduos em praticamente sua totalidade, proporciona uma economia em produtos para aplicação no solo e também segurança e flexibilidade ao permitir que os insumos sejam produzidos internamente.

Uma breve caracterização dos resíduos sólidos da produção de celulose e papel, segundo Barretto (2008) e Foelkel (2008), pode ser vista na tabela 1:

Tabela 1 - Caracterização dos resíduos sólidos industriais do setor de celulose e papel

Resíduos Sólidos	Características principais
Lodo de ETE	Predominantemente orgânico. O lodo primário apresenta fibras de celulose e alta relação C/N (150 a 250), enquanto o secundário é oriundo do processo de lodos ativados e possui baixa relação C/N (5 a 30).
Cinzas de Biomassa	Predominantemente inorgânico. Baixo teor de carbono e presença de metais oriundos da madeira, como cálcio, magnésio e potássio.
Dregs	Predominantemente inorgânico. Possui alto teor de sódio e pode conter carbono não queimado, ferro, sílica, cálcio, magnésio e sulfetos. Apresenta alto poder de neutralização.
Grits	Predominantemente inorgânico. Apresenta concentrações elevadas de cálcio e sódio, bem como alto poder de neutralização. Possui teores relativamente baixos de magnésio, fósforo e potássio.
Lama de Cal	Predominantemente inorgânico, e composto principalmente por carbonato de cálcio.
Rejeito de Cal	Predominantemente inorgânico, e composto principalmente por óxido de cálcio, com impurezas de carbonato de cálcio.

Fonte: Adaptado de Barretto (2008) e Foelkel (2008).

Considerando os aspectos técnicos da aplicação e as caracterizações apresentadas, os resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos do setor de celulose e papel possuem grande potencial agrônomo, uma vez que o lodo das estações de tratamento de efluentes industriais conhecidamente fonte de nitrogênio e matéria orgânica; as cinzas das caldeiras de biomassa são fontes de potássio; e os resíduos inorgânicos, como os *dregs*, *grits*, lama de cal e rejeito de cal, em geral, apresentam alto teor de cálcio e alto pH, conferindo poder de neutralização de acidez no solo.

Para aqueles resíduos orgânicos possíveis de serem aplicados aos solos, a determinação da taxa de aplicação depende, além de suas características físico-

químicas, também da necessidade nutricional das plantas e de condições edafoclimáticas de cada região. Assim, os resíduos poderão ser destinados aos estágios de tratamento e enriquecimento apropriados para que as especificações técnicas dos produtos requeridos em cada local sejam atendidas, bem como não haja quaisquer danos ao meio ambiente e à produtividade das florestas e outras culturas.

Além dos aspectos técnicos, os custos diretos de tratamento, aquisição de insumos para enriquecimento dos fertilizantes e corretivos de solo, transporte e aplicação no campo podem inviabilizar economicamente o uso de resíduos orgânicos como fertilizante, e precisam ser cuidadosamente avaliados. Por fim, faz-se também necessário o conhecimento dos parâmetros ambientais dos resíduos e do produto após formulação, bem como os custos indiretos referentes ao licenciamento, de forma a obter a aprovação do órgão ambiental para instalação e operação da estação.

Portanto, tem-se como objetivo deste estudo levantar os fatores que afetam a destinação de resíduos sólidos orgânicos do setor de celulose e papel como fertilizante orgânico e corretivo de solo, tendo como base artigos científicos publicados sobre o assunto. Espera-se que os resultados do estudo forneçam um panorama geral sobre os fatores mais relevantes que influenciam a viabilidade técnica, legal e econômica desta alternativa de destinação, bem como suas potencialidades e desafios.

2. METODOLOGIA

O presente estudo utilizou como metodologia a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) de acordo com as diretrizes do PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*). De acordo com PAGE et al. (2021), uma revisão sistemática deve ser completa, transparente e demonstrar de forma detalhada como foi elaborada e o seus achados, de forma que ela possa ser replicada por outros pesquisadores. Além disso, a Revisão Sistemática de Literatura pelo método PRISMA é rigorosa, fornece informações e promove confiabilidade das fontes e transparência sobre o assunto a ser estudado. Com base nesta pesquisa e ampla gama de trabalhos publicados, buscou-se compilar artigos que abordassem uma visão geral da aplicação de resíduos orgânicos sólidos industriais do setor de celulose e papel como fertilizantes e corretivos de solo, seja *in natura* ou processado de alguma forma.

Como primeiro passo da RSL, foi formulada uma pergunta a ser respondida através da revisão: “Quais os desafios e potencialidades da destinação de resíduos sólidos industriais da produção de celulose e papel como fertilizantes orgânicos e corretivos de solo?”. Então, foi selecionada uma plataforma confiável, o que neste trabalho foi feito através do Portal CAPES, e as bases de dados escolhidas foram a *Scopus* e *Web of Science*.

A busca em ambas as bases de dados foi realizada com a seguinte expressão: *ALL = (pulp* OR eucalyptus OR kraft) AND (solid residue* OR residue* OR waste* OR dregs OR grits OR sludge OR ash OR lime mud) AND (fertilizer* OR soil* OR agricultur*)*. Desta forma, foi possível considerar os materiais de interesse, como lodos de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), resíduos da Recuperação do Licor Verde (como *Dregs*, *Grits*, Lama de Cal, Rejeito de Cal e alguns tipos de cinzas) e Cinzas de Caldeiras de Biomassa. Em seguida, os Critérios de Elegibilidade foram definidos considerando trabalhos publicados entre 2003 e 2023, em inglês ou português e de qualquer região, visto que a viabilidade de um projeto para aplicação de produtos oriundos de resíduos sólidos industriais no solo independe da localidade.

Na sequência, a busca foi refinada de forma a limitar a pesquisa às áreas correlacionadas ao tema (excluindo, por exemplo, temas relacionados à medicina, microbiologia e outras áreas de pouca interface com a gestão de resíduos sólidos industriais do setor de celulose). Nos Micro-Tópicos da *Web of Science*, foram mantidos os artigos retornados de acordo com os seguintes filtros: *Cellulose; Heavy Metals; Anaerobic Digestion; Composting; Fly Ash; Forest Management; Soil Erosion; Wood; Life Cycle Assessment; e Paper Properties*. Na *Scopus*, por sua vez, as áreas selecionadas foram as seguintes: *Environmental Science; Agricultural and Biological Sciences; e Economics, Econometrics and Finance*. Por fim, ainda na *Scopus*, outro filtro aplicado para seleção dos artigos mantidos foi: *Wastewater Treatment; Industrial Waste; Wastewater; Sludge; Biomass; Heavy Metals; Soil; Heavy Metal; Composting; Waste Management; Fly Ash; Cellulose; Waste Treatment; Waste Water Treatment; Water Treatment; Solid Waste; Soils; Lime; Waste Disposal; Waste; Ash; Vermicompost; Sustainable Development; and Paper and Pulp Mills*. A pesquisa foi realizada em julho de 2023.

Após a etapa de pesquisas em cada uma das duas bases de dados, foi exportado um arquivo em formato de texto (.txt) contendo os meta dados das publicações, ou seja, o título, resumo, autores, ano de publicação, revista e palavras-chave para inclusão no software VOSViewer, utilizado para construção e visualização de redes bibliométricas (VOSVIEWER, 2023). Nesta etapa, foi realizada a checagem das principais palavras-chave contidas nos artigos pré-selecionados, de forma a verificar se não havia outro termo relevante a ser incluído na pesquisa.

Por fim, os arquivos no formato texto foram também inseridos na plataforma *Rayyan* (<https://www.rayyan.ai>), utilizada na etapa de *screening* (triagem) dos artigos e seleção dos que potencialmente são capazes de responder à pergunta estabelecida como objetivo deste trabalho. Além de apoiar na remoção de artigos duplicados, a plataforma auxilia na organização e visualização dos títulos, autores e resumos para melhor seleção. Através do Rayyan, foi feita a leitura dos títulos e resumos de cada artigo a fim de verificar sua relevância para responder à pergunta de pesquisa. Nesse sentido, foram pré-selecionados os que apresentaram informações sobre a aplicação ao solo de pelo menos um dos resíduos orgânicos do setor de celulose, mesmo que em conjunto com resíduos sólidos de outras atividades. Os artigos, por sua vez, que abordavam materiais ou resíduos sólidos de outros setores, ou que abordavam os resíduos de interesse, mas não tinham enfoque na aplicação no solo, foram excluídos.

Por fim, os artigos selecionados na etapa de *screening* foram lidos na íntegra de forma a verificar e consolidar as informações disponíveis para responder a pergunta determinada neste trabalho.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca inicial com as palavras-chave, idiomas, períodos e filtros definidos na plataforma Web of Science retornou um resultado de 685 artigos, enquanto a Scopus retornou 533, totalizando 1.218 artigos encontrados com as palavras-chaves utilizadas. A Figura 1 apresenta o quatro clusters principais.

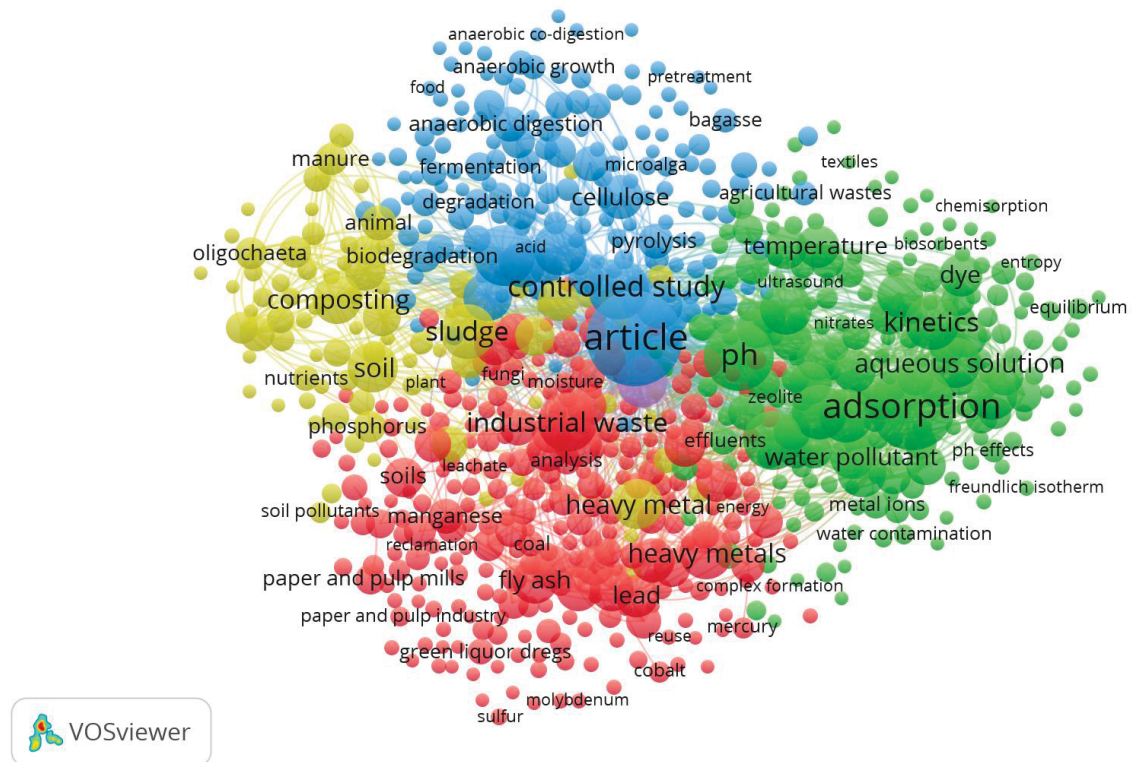


Figura 1 - Clusters de palavras-chave identificados nos metadados de artigos obtidos nas plataformas Web of Science e Scopus através do software VOSViewer

É possível observar, primeiramente, um cluster centrado em solos; outro focado em gestão de resíduos industriais e metais presentes nos mesmos; um terceiro sobre tratamento de águas e efluentes e propriedades físico-químicas; e o último sobre biomassa, celulose e processos térmicos e microbiológicos.

A partir dos resultados encontrados na análise prévia de palavras-chave pelo VOSViewer e na etapa de *screening*, observou-se uma ampla gama de trabalhos publicados que analisaram os efeitos ambientais de diferentes destinações dos resíduos da produção de celulose. No entanto, o foco de cerca de metade dos estudos apresentou não era a aplicação na agricultura – como a produção de biogás e biometano – e outra grande parte focou em resíduos sólidos de atividades agrícolas/florestais (como cascas e outros subprodutos) e/ou de outros setores industriais. Mais especificamente, na etapa de *screening* foi identificada a presença de 18 artigos duplicados, os quais foram removidos. Dos 1.200 artigos remanescentes,

1.099 foram excluídos após a leitura dos resumos, restando 101 selecionados para leitura na íntegra com potencial para responder à pergunta de pesquisa.

Seguindo para a etapa de leitura na íntegra, 60 artigos foram removidos devido a apresentarem um grande enfoque em discutir alternativas de compostagem dos resíduos com diferentes bactérias sem avaliar a posterior aplicação do produto no solo; por abordarem compostos de resíduos de celulose com materiais de outros setores, por não ser possível separar os efeitos específicos dos resíduos sólidos de interesse; por incorporarem outros químicos aos resíduos, não se aplicando à realidade estudada; ou por não especificarem quais resíduos sólidos estavam de fato sendo abordados no estudo (apenas mencionaram “resíduos sólidos da produção de celulose e papel” de forma generalista). Desta forma, 41 artigos foram selecionados para este estudo (Figura 2).

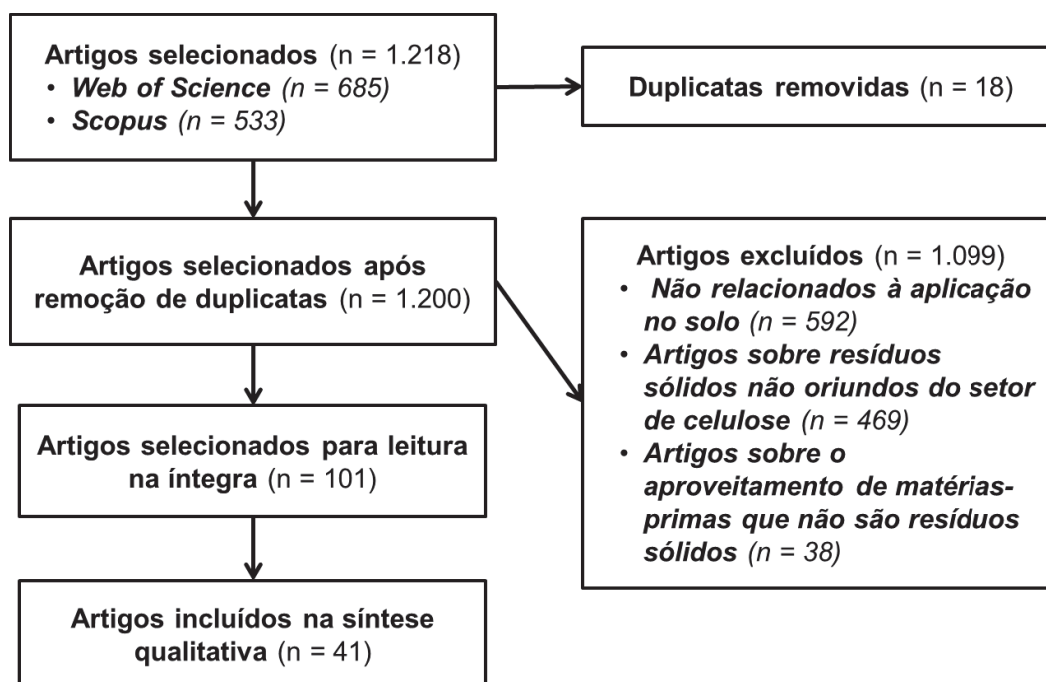


Figura 2 - Fluxograma do Protocolo PRISMA para Revisão Sistemática de Literatura

Em relação a evolução temporal dos 41 artigos, nota-se que as publicações foram distribuídas ao longo das últimas duas décadas. Do total, 40 artigos foram publicados entre 2003 e 2022, conforme pode ser observado na Figura 3.

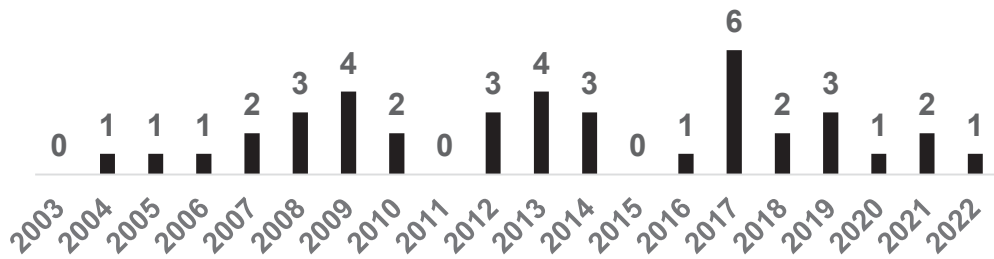


Figura 3 - Distribuição dos anos dos artigos selecionados durante leitura na íntegra

Em 2023, até o momento da pesquisa, apenas um artigo havia sido publicado. Devido ao ano ainda não ter sido concluído, ele não foi incluído no gráfico temporal de evolução de publicações. Porém, ele foi incluído e considerado na revisão.

Em seguida, foi observado que os 41 artigos selecionados foram publicados em 29 periódicos – ou seja, nenhuma revista concentrou grande parte dos artigos, indicando que o tema está bem distribuído em diferentes fontes. Para aferir a qualidade das revistas, elas foram consultadas na Plataforma Sucupira, sistema de classificação de periódicos para avaliação de programas de pós-graduação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), conhecido como Qualis CAPES, classificação 2017 a 2020, sendo A1 a revista de maior qualidade. Os principais periódicos resultantes na busca, bem como suas Qualis e o número de artigos desta revisão publicados em cada um, se encontram na Tabela 2:

Tabela 2 - Principais periódicos resultantes na busca, suas Qualis e artigos publicados

Revista	Qualis	Artigos
Canadian Journal of Soil Science	A4	4
Fuel Processing Technology	A1	3
Chemosphere	A1	2
Environmental Science and Pollution Research	A2	2
Forest Science	A3	2
Journal of Cleaner Production	A1	2
Journal of Environmental Quality	A2	2
Science of the Total Environment	A1	2

Fonte: Plataforma Sucupira

Nos artigos selecionados incluídos na revisão, nota-se uma predominância de estudos que abordam os lodos de estações de tratamento de efluentes das fábricas de celulose e papel e as cinzas leves (do precipitador eletrostático) e pesadas de caldeiras de biomassa – o que se dá tanto por características dos resíduos quanto pelas suas altas gerações.

Em relação ao lodo das estações de tratamento de efluentes industriais das fábricas de celulose e papel, sua aplicação em doses adequadas no solo (CORBEL et al, 2016), após compostagem e tratamento adequado, segundo Abdi et al (2017), Dinél et al. (2004), Fraser, O'Halloran e Van Den Heuvel (2009), Gagnon et al (2014) e Lee et al. (2017) contribuiu com o aumento dos teores de carbono, nitrogênio e fósforo, do crescimento das plantas de diferentes culturas e outros benefícios, como elevação do pH (POYKIO, NURMESNIEMI e KEISKI, 2007). Em alguns casos, conforme relatado por Gagnon e Ziadi (2012), o lodo por si só não forneceu o aumento esperado de todos os macronutrientes, como Potássio e Magnésio, devendo haver um enriquecimento prévio destes componentes antes de sua aplicação no campo. Adicionalmente, de acordo com Alvarenga et al. (2019), Cruz et al (2023), Morris et al. (2012), Ribeiro, Tarelho e Gomes (2018) e Undurraga et al. (2017), quando combinados às cinzas de biomassa e demais resíduos alcalinos, também fornecem bons resultados como agentes de calagem. No entanto, apesar de nenhuma toxicidade relevantes ter sido atribuída à flora, solo ou ambiente, Gagnon et al (2013), Hazarika et al. (2017) e Poykio et al. (2014) enfatizam a necessidade de monitorar os teores de metais tóxicos no solo, como cádmio, mercúrio, chumbo, molibdênio, entre outros, os quais em alguns estudos apresentaram aumento (apesar de inferiores ao permitido pelas legislações locais). Além disso, é importante ressaltar que estes resultados são aplicáveis ao lodo compostado, pois caso não haja tratamento prévio ao seu uso como fertilizante orgânico, de acordo com Oksanen, Poykio e Dahl (2021), alguns prejuízos podem ser acarretados no ambiente - como, por exemplo, a inserção de microrganismos como *E. coli*, entre outros, que têm potencial de desequilibrar a dinâmica do ecossistema.

As cinzas das caldeiras de biomassa, por sua vez, promoveram o aumento de pH devido à presença de carbonatos, óxidos, hidróxidos e silicatos de cálcio, magnésio, sódio e potássio, além de contribuir para a fertilidade do solo devido ao incremento de

fósforo, potássio e boro (DOMES et al., 2018; SHARIFI et al., 2013). Em alguns casos, como nos trabalhos de Gomes-Rey et al. (2013) e Hart et al. (2019), notou-se um aumento na disponibilidade de carbono e nitrogênio e na produtividade das culturas e, de acordo com Nurmesniemi et al. (2008), de cálcio. Poblete, Cortes e Munizaga-Plaza (2022) identificaram também aumento nas dimensões do tronco das árvores com a aplicação deste resíduo. Nos trabalhos avaliados, tanto para a aplicação de cinzas leves (do precipitador eletrostático) quanto de cinzas pesadas (purga do leito da caldeira), os teores de metais tóxicos no solo se mantiveram abaixo do estabelecido como limite pelas legislações ambientais (DAHL et al., 2009) – apenas dois estudos, de Dahl et al. (2010) e Poykio, Nurmesniemi e Keiski (2009), identificaram aumento de arsênio e chumbo, inviabilizando o uso das cinzas individualmente, recomendando como necessário estudo mais aprofundado destes metais neste resíduo. Um exemplo do uso do resíduo em uma plantação de *Pinus* mostrou aumento na disponibilidade de cálcio e magnésio e no pH do solo, inclusive em camadas mais profundas e em maior período de tempo (QUADROS et al., 2021). Por fim, a aplicação de cinzas na floresta em um estudo mostrou custos 15% a 20% superiores à disposição em aterros, porém os autores identificaram diversos ganhos ambientais e economias a serem contabilizadas na compra de insumos (HOPE et al., 2017). Em suma, os trabalhos identificaram grande potencial agrônômico no uso das cinzas de biomassa para aplicação no solo, seja individualmente, junto a outros resíduos do setor ou após alguma etapa de enriquecimento (ALVARENGA et al., 2019; CABRAL et al., 2008; GAGNON e ZIADI, 2012; GAGNON et al., 2014; NURMESNIEMI et al., 2008; NURMESNIEMI et al., 2012; POYKIO et al., 2005; UNDURRAGA et al., 2017).

Os *dregs* e *grits*, por sua vez, são gerados na etapa de recuperação do licor verde e também foram amplamente abordados pelos autores nos trabalhos avaliados. De forma geral, segundo Nurmesniemi et al. (2010), Sebogodi et al. (2020) e Żolnowski et al. (2019), estes resíduos apresentaram alto potencial como agentes de calagem devido às propriedades alcalinas (principalmente por hidrólise dos carbonatos de cálcio em óxidos, o que confere maior aumento de pH), aos teores de cálcio e magnésio similares ao calcário comercial (porém conferindo maior incremento ao solo). Além disso, contribuíram com a presença de potássio, fósforo e alguns micronutrientes, como

cobre, zinco e boro (ZAMBRANO et al., 2007). Além disso, os autores identificaram que quando aplicados nas formulações e concentrações corretas, não promoveram aumento de sódio no solo, apesar deste metal estar presente em suas composições devido ao processo industrial (CABRAL et al., 2008). Assim como no caso do lodo, os teores de metais tóxicos da aplicação de *dregs* e *grits* também foram inferiores ao limite estabelecido pelas legislações aplicáveis, segundo Nurmesniemi et al. (2010), porém é importante monitorar e controlar de forma mais aprofundada suas concentrações no solo, pelo menos no início das aplicações. Um ponto de atenção, no entanto, de acordo com o trabalho de Jia et al (2017), é a aplicação ao solo da combinação de *dregs* e cinzas leves de biomassa, por elevarem ao pH do solo, além de também levarem a precipitação de alguns metais, dos quais Zn e Ni merecem atenção especial em futuras pesquisas. Do ponto de vista geotécnico, no entanto, segundo os mesmos autores, a aplicação foi satisfatória.

No que diz respeito à lama de cal e ao rejeito de cal, também obtidos na etapa de recuperação química, estes resíduos, assim como os *dregs* e *grits*, apresentam alto potencial para elevação de pH do solo nos estudos avaliados. Além disso, He, Lange e Dougherty (2009) identificaram, nos Estados Unidos, até 10% de aumento de produtividade com aplicações controladas e nas formulações corretas de lama de cal. Segundo Poykio et al (2006), o rejeito de cal, por sua vez, apresentou teor de cálcio consideravelmente superior ao que normalmente é encontrado no solo, apresentando grande potencial de incremento deste metal, assim como os corretivos convencionais. Além disso, também apresentou teor de magnésio, um metal cuja disponibilidade é necessária para garantir a produtividade do eucalipto (POYKIO et al., 2006). Neste caso também se faz necessário o monitoramento de metais tóxicos, apesar de se manterem abaixo do permitido pela legislação, e do estudo das melhores formulações com outros resíduos ou insumos, de forma a garantir que não haja nenhum desequilíbrio no solo e na planta (GAGNON e ZIADI, 2012; GAGNON et al., 2013; GAGNON et al., 2014; HE, LANGE e DOUGHERTY, 2009.; POYKIO et al., 2006; POYKIO e NURMESNIEMI, 2008; ZAMBRANO et al., 2007).

Por fim, representando uma tecnologia bastante nova no setor de celulose, as cinzas da gaseificação também foram encontrada nesta revisão, o que é bastante

interessante, pois o uso de gaseificadores tem crescido no setor de celulose como opção para remover os combustíveis fósseis do forno de cal. Neste caso, Kilpimaa, Kuokkanen e Lassi (2013) identificaram que as cinzas apresentaram potencial de uso como fertilizante e condicionador de solo. Os autores destacam que o teor de metais tóxicos neste resíduo é inferior à legislação, indicando sua viabilidade ambiental.

No geral, os 41 artigos que compuseram esta Revisão Sistemática da Literatura trataram, de alguma forma, da viabilidade técnica do uso de alguns resíduos sólidos industriais do processo produtivo de celulose e papel como fertilizantes e corretivos de solo, seja para fins de fertilização ou como condicionador. Os resultados de tais estudos indicam que, dentro de certas condições, essa alternativa de destinação é promissora. Em relação à viabilidade ambiental, um ponto de atenção é a elevação das concentrações de metais tóxicos que podem ser acumulados no solo, apesar de terem se mantido abaixo dos limites estabelecidos pelas legislações ambientais. Nesse sentido, os autores ressaltam a importância de monitoramento periódico a fim de garantir que não haja nenhum impacto ambiental negativo significativo.

Em relação à viabilidade econômica, no entanto, apenas um estudo (Hope et al., 2017) incluiu essa questão, limitando-se a comparar os custos operacionais aos da disposição das cinzas em aterro. Desta forma, apesar de grande número de estudos científicos evidenciar a viabilidade técnica e ambiental da destinação dos resíduos ao solo, há ainda uma lacuna na literatura referente à comprovação de seus benefícios econômicos.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A disposição de resíduos sólidos industriais em aterros sanitários representa um desafio significativo no setor de celulose e papel, promovendo assim a necessidade de pesquisas aprofundadas sobre a utilização desses resíduos como condicionadores de solo e fertilizantes orgânicos em diversas nações e em diferentes contextos agroflorestais.

Nesse âmbito, os 41 artigos selecionados na Revisão Sistemática de Literatura examinaram resultados de estudos científicos realizados com lodo de Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), resíduos gerados no ciclo de recuperação de licor

verde e as cinzas provenientes de caldeiras de biomassa. Estes estudos também investigaram os tratamentos apropriados, incluindo o processo de compostagem para os resíduos orgânicos, e os impactos desses materiais quando aplicados ao solo. Os resultados indicam que após processamento e tratamento adequados, juntamente com formulações apropriadas, esses resíduos demonstraram um elevado potencial para controlar a acidez do solo, elevar o pH, aumentar a fertilidade devido à disponibilidade de macronutrientes e promover o aumento da produtividade nas culturas avaliadas. Isso confirma a viabilidade técnica de sua utilização como insumos no solo.

No que tange à viabilidade ambiental, diversos artigos analisaram os níveis de metais tóxicos no solo e nos produtos resultantes, os quais se mantiveram abaixo dos limites estabelecidos pelas regulamentações dos países onde as pesquisas foram conduzidas. Não obstante, um monitoramento contínuo dos teores de metais é essencial, especialmente no início da aplicação, a fim de mitigar quaisquer possíveis impactos ambientais adversos.

Por fim, este estudo evidenciou a escassez de investigações na literatura que abordem a dimensão econômica da utilização dos resíduos como fertilizantes e condicionadores de solo. Considerando tais resultados, recomenda-se a condução de estudos de viabilidade econômica para avaliar de maneira abrangente essa alternativa de gestão dos resíduos provenientes da indústria de papel e celulose.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI, D. et al. **Residual effects of paper mill biosolids and liming materials on soil microbial biomass and community structure.** Canadian Journal of Soil Science, v. 97, 2017.

ALVARENGA, P. et al. **Use of wastes from the pulp and paper industry for the remediation of soils degraded by mining activities: Chemical, biochemical and ecotoxicological effects.** Science of the Total Environment, v. 686, p. 1152-1163, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004 – Resíduos sólidos - classificação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

BARRETTO, V. C. M. **Resíduos de indústria de celulose e papel na fertilidade do solo e no desenvolvimento de eucalipto.** Tese (Doutorado em Agronomia – Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual de São Paulo. Jaboticabal, SP, 2008.

BRASIL. **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, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 21 ago. 2023.

CABRAL, F. et al. **Use of pulp mill inorganic wastes as alternative liming materials.** Bioresource Technology, v. 99, p. 8294-8298, 2008.

CORBEL, S. et al. **Effects of repeated soil irrigation with liquid biological paper sludge on poplar *Populus alba* saplings: potential risks and benefits.** Environmental Science and Pollution Research, v. 23, p. 21584-21593, 2016.

CRUZ, N. et al. **Biomass ash-based soil improvers: Impact of formulation and stabilization conditions on materials properties.** Journal of Cleaner Production, v. 391, 2023.

DAHL, O. et al. **Comparison of the characteristics of bottom ash and fly ash from a medium-size (32 MW) municipal district heating plant incinerating forest residues and peat in a fluidized-bed boiler.** Fuel Processing Technology, v. 90, p. 871-878, 2009.

DAHL, O. et al. **Heavy metal concentrations in bottom ash and fly ash fractions from a large-sized (246 MW) fluidized bed boiler with respect to their Finnish forest fertilizer limit values.** Fuel Processing Technology, v. 91, p. 1634-1639, 2010.

DINEL, H. et al. **Co-composting of paper mill sludge and hardwood sawdust under two types of in-vessel processes**. Journal of Environmental Science and Health, Part B: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, v. 39, p. 139-151, 2004.

DOMES, K. A. et al. **Short-term changes in spruce foliar nutrients and soil properties in response to wood ash application in the sub-boreal climate zone of British Columbia**. Canadian Journal of Soil Science, v. 98, p. 246-263, 2018.

FRASES, D. S.; O'HALLORAN, K.; VAN DEN HEUVEL, M. R. **Toxicity of pulp and paper solid organic waste constituents to soil organisms**. Chemosphere, v. 74, p. 660-668, 2009.

FOELKEL, C. **Resíduos Sólidos Industriais do Processo de Fabricação de Celulose e Papel de Eucalipto. Parte 02: Fatores de sucesso para seu gerenciamento**. Eucalyptus Online Book, 2008. Disponível em: <https://www.eucalyptus.com.br/eucalipos/PT13_Residuos02.pdf>. Acesso em 05/01/2023.

GAGNON, B.; ZIADI, N. **Papermill biosolids and alkaline residuals affect crop yield and soil properties over nine years of continuous application**.

GAGNON, B. et al. **Metal availability following paper mill and alkaline residuals application to field crops**. Journal of Environmental Quality, v. 42, p. 412-420, 2013.

GAGNON, B. et al. **Repeated Annual Paper Mill and Alkaline Residuals Application Affects Soil Metal Fractions**. Journal of Environmental Quality, v. 43, p. 517-527, 2014.

GOMES-REY, M. X. et al. **Soil C and N dynamics, nutrient leaching and fertility in a pine plantation amended with wood ash under Mediterranean climate**. European Journal of Forest Research, v. 132, p. 281-295, 2013.

HART, S. C. et al. **Early response of understory vegetation to wood ash fertilization in the sub boreal climatic zone of British Columbia**. The Forestry Chronicle, v. 95, p. 135-142, 2019.

HAZARIKA, J. et al. **Transformation of elemental toxic metals into immobile fractions in paper mill sludge through rotary drum composting**. Ecological Engineering, v. 101, p. 185-192, 2017.

HE, J.; LANGE, C. R.; DOUGHERTY, M. **Laboratory study using paper mill lime mud for agronomic benefit**. Process Safety and Environmental Protection, v. 87, p. 401-405, 2009.

HOPE, E. S. et al. **A cost analysis of bioenergy-generated ash disposal options in Canada**. Canadian Journal of Forest Research, v. 47, p. 1222-1231, 2017.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório Anual 2022**. Disponível em <<https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2022-compactado.pdf>>. Acesso em 05/01/2023.

JIA, Y. et al. **Elemental mobility in sulfidic mine tailings reclaimed with paper mill by-products as sealing materials**. Environmental Science and Pollution Research, v. 24, p. 20372-20389, 2017.

KILPIMAA, S.; KUOKKANEN, T.; LASSI, U. **Characterization and Utilization Potential of Wood Ash from Combustion Process and Carbon Residue from Gasification Process**. Bioresources, v. 8, p. 1011-1027, 2013.

LEE, J. Y. et al. **Effect of composting of paper mill sludge for land spreading**. Nordic Pulp and Paper Research Journal, v. 32, p. 691-698, 2017.

MORRIS, L. A. et al. **Greenhouse and field response of southern pine seedlings to pulp mill residues applied as soil amendments**. Forest Science, v. 58, p. 618-632, 2012.

NURMESNIEMI, H. et al. **Chemical sequential extraction of heavy metals and sulphur in bottom ash and in fly ash from a pulp and paper mill complex**. Waste Management and Research, v. 26, p. 389-399, 2008.

NURMESNIEMI, H. et al. **Total and extractable heavy metal, phosphorous and sulfur concentrations in slaker grits from the causticizing process of a pulp mill for use as a soil amendment**. Chemical Speciation and Bioavailability, v. 22, p. 87-97, 2010.

NURMESNIEMI, H. et al. **Comparison of the forest fertilizer properties of ash fractions from two power plants of pulp and paper mills incinerating biomass-based fuels**. Fuel Processing Technology, v. 104, p. 1-6, 2012.

OKSANEN, J.; POYKIO, R.; DAHL, O. **Comparison of Untreated, Lime-Stabilised and Composted Wastewater Sludges from a Pulp, Board and Paper Mill Integrate as a Fertiliser Product**. Journal of Ecological Engineering, v. 22, p. 47-58, 2021.

PAGE M. J.; et al. **The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews**. Research Methods and Reporting. BMJ 2021;372:n71. <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.n71>.

PLATAFORMA SUCUPIRA. **Qualis Periódicos**. Disponível em: <<https://sucupira.capes.gov.br/sucupira/>>. Acessado em 02/06/2023.

POBLETE, R.; CORTES, E.; MUNIZAGA-PLAZA, J. A. **Carbon dioxide emission control of a vermicompost process using fly ash**. Science of the Total Environment, v. 803, 2022.

POYKIO, R. et al. **Leachability of metals in fly ash from a pulp and paper mill complex and environmental risk characterisation for eco-efficient utilization of the fly ash as a fertilizer.** *Chemical Speciation and Bioavailability*, v. 17, p. 1-9, 2005.

POYKIO, R. et al. **The use of a sequential leaching procedure for assessing the heavy metal leachability in lime waste from the lime kiln at a causticizing process of a pulp mill.** *Chemosphere*, v. 65, p. 2122-2129, 2006.

POYKIO, R. et al. **Chemical characterisation of biosludge from a wastewater treatment plant in a neutral sulphite semi-chemical pulp mill by single and sequential extraction of heavy metals and micro-/macronutrients - a case study.** *Chemical Papers*, v. 68, p. 1546-1554, 2014.

POYKIO, R.; NURMESNIEMI, H. **Calcium carbonate waste from an integrated pulp and paper mill as a potential liming agent.** *Environmental Chemistry Letters*, v. 6, p. 47-51, 2008.

POYKIO, R.; NURMESNIEMI, H.; KEISKI, R.L. **Environmental risk assessment of heavy metal extractability in a biosludge from the biological wastewater treatment plant of a pulp and paper mill.** *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 128, p. 153-164, 2007.

POYKIO, R.; NURMESNIEMI, H.; KEISKI, R.L. **Total and size fractionated concentrations of metals in combustion ash from forest residues and peat.** *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, v. 58, p. 247-254, 2009.

PUGLIESE, S. et al. **Wood ash as a forest soil amendment: The role of boiler and soil type on soil property response.** *Canadian Journal of Soil Science*, v. 94, p. 621-634, 2014.

QUADROS, L. P. et al. **Effects of Wood Ash Application on Tree Nutrition and Soil Dynamics in a Pinus taeda System.** *Forest Science*, v. 67, p. 618-628, 2021.

RIBEIRO, JP.; TARELHO, L.; GOMES, A.P. **Incorporation of biomass fly ash and biological sludge in the soil: effects along the soil profile and in the leachate water.** *Journal of Soils and Sediments*, v. 18, p. 2023-2031, 2018.

SEBOGODI, K. R. et al. **Beneficiation of pulp mill waste green liquor dregs: Applications in treatment of acid mine drainage as new disposal solution in South Africa.** *Journal of Cleaner Production*, v. 246, 2020.

SENAR. **Guerra Rússia-Ucrânia: o panorama do abastecimento de fertilizantes.** 2022. Disponível em <<https://cnabrazil.org.br/noticias/guerra-russia-ucrania-o-panorama-do-abastecimento-de-fertilizantes>>. Acessado em 10/10/2023.

SHARIFI, M. et al. **Evaluation of liming properties and potassium bioavailability of three Atlantic Canada wood ash sources.** Canadian Journal of Plant Science, v. 93, p. 1209-1216, 2013.

UNDURRAGA, P. et al. **Pelletized paper mill waste promotes nutrient input and N mineralization in a degraded Alfisol.** Chilean Journal of Agricultural Research, v. 77, p. 390-399, 2017.

VOSVIEWER. VOSViewer - Visualizing Scientific Landscapes. Disponível em <<https://www.vosviewer.com/>>. Acessado em 19/05/2023.

ZAMBRANO, M. et al. **Acids soils' pH and nutrient improvement when amended with inorganic solid wastes from kraft mill.** Journal of the Chilean Chemical Society, v. 52, p. 1169-1172, 2007.

ŻOLNOWSKI, A. C. et al. **Impact of Paper Mill Waste on Physicochemical Properties of Soil, Crop Yield, and Chemical Composition of Plants.** Clean – Soil, Air, Water, v. 47, 2019.