

Influência da idade no rendimento e composição química imediata do carvão vegetal de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Raquel Julia Cipriano dos Santos¹, Sherellyn Daphnee Alves Moretti¹, Leticia Costa Peres¹,
Thaynara Silva Vieira¹, Nicolle De Filippo Brumano¹, Angélica de Cássia Oliveira Carneiro¹

¹ Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), Departamento de Engenharia Florestal,
Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, Brasil – lapem@ufv.br

Resumo: O estudo avaliou o efeito da idade da colheita em árvores de *Eucalyptus* e *Corymbia* no rendimento e composição química imediata do carvão vegetal. Cinco genótipos foram testados em três idades, retirando seis discos de cada árvore em diferentes alturas. A carbonização foi feita em forno elétrico tipo mufla. A composição química imediata de acordo com a norma NBR – 8112. Os resultados indicam redução no teor de cinzas com incremento da idade. O clone *C. citriodora* x *C. torelliana* teve a maior massa de carvão vegetal ($t\ ha^{-1}\ ano^{-1}$), enquanto *E. grandis* x *E. urophylla*, aos sete anos, obteve o maior rendimento gravimétrico. Conclui-se que o melhor clone para carvão siderúrgico é *C. citriodora* x *C. torelliana*, aos sete anos, devido a maior produtividade de carvão por hectare e por produtividade por forno.

Palavras-chaves: Ciclo de corte, Pirólise, Melhoramento genético.

Influence of tree age on yield and proximate analysis of charcoal of *Eucalyptus* and *Corymbia*

Abstract: The cutting age of the trees affects productivity and the quality of wood and charcoal for energy. The study aimed to assess how the harvest age of *Eucalyptus* and *Corymbia* trees affects the yield and proximate analysis of charcoal. Five genotypes were tested at three different ages, with six discs taken from each tree at varying heights. Pyrolysis was done in a muffle oven. Results indicate a decrease in charcoal ash content with increasing age. The clone *C. citriodora* x *C. torelliana* had the the highest charcoal mass ($t\ ha^{-1}\ year^{-1}$), while *E. grandis* x *E. urophylla*, at seven years, had the highest gravimetric yield. It is concluded that the best clone for steelmaking coal is *C. citriodora* x *C. torelliana*, at seven years old, due to greater coal productivity per hectare and productivity per oven.

Keywords: Cutting cycle, Pyrolysis, Genetic Breeding.

1. INTRODUÇÃO

A biomassa florestal pode ser usada como lenha, cavaco ou carvão vegetal. No Brasil, o carvão vegetal é utilizado principalmente em indústrias siderúrgicas, fornecendo carbono para reações de redução e energia na forma de calor para o sistema (EPE, 2022; Protásio et al., 2021; Silva; Ataíde, 2019), sendo ainda um processo de carbono neutro, já que reflorestamentos podem neutralizar a emissão de dióxido de carbono ao longo de seu crescimento (Gavrilescu, 2008; Hurteau et al., 2019; Zhang et al., 2020).

Os gêneros *Eucalyptus* e *Corymbia* são destaques na obtenção de biomassa florestal devido aos avanços no melhoramento genético e nas tecnologias de manejo. No entanto, a seleção de clones com base apenas em medidas dendrométricas pode não garantir características tecnológicas desejadas da madeira. Estudos sobre a qualidade da madeira são cruciais para a seleção adequada de material genético para produção de carvão vegetal (Lopes et al., 2017). A crescente demanda por produtos de madeira tem intensificado práticas silviculturais, focando em clones de maior produtividade e ciclos de crescimento mais curtos (BORGES, 2023).

Entender como o clone e a idade afetam as características do carvão é crucial para determinar o ciclo de corte e selecionar material genético. Este estudo visa avaliar como a idade das árvores de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* influencia o rendimento gravimétrico e a composição química imediata do carvão vegetal visando seu uso na siderurgia para produção de ferro gusa e aço verde.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Neste estudo, cinco diferentes genótipos foram usados (Tabela 1), quatro de *Eucalyptus* spp. e um híbrido de *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*, com idades de cinco, seis e sete anos. Foram escolhidas três árvores de tamanho médio em cada idade, excluindo aquelas nas bordas, suprimidas ou com defeitos, totalizando 45 árvores. As árvores foram colhidas de plantações comerciais com espaçamento de 6 x 1,5 metros.

Tabela 1. Identificação dos genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia* utilizados no estudo

Genótipos	Idade (anos)	Incremento Médio Anual ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$)
<i>C. citriodora</i> x <i>C. torelliana</i>	5	28,20
	6	36,72
	7	51,19
<i>E. urophylla</i>	5	58,52
	6	52,43

	7	48,73
	5	41,33
<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>	6	39,95
	7	43,19
	5	53,02
<i>E. urophylla</i> x <i>E. camaldulensis</i> x <i>E. grandis</i>	6	34,36
	7	40,99
	5	53,62
<i>E. urophylla</i> x <i>E. pellita</i>	6	43,65
	7	56,66

Os materiais foram preparados retirando seis discos em diferentes posições do tronco: 0%, DAP (diâmetro à altura do peito), 25%, 50%, 75% e 100% da altura comercial. Esses discos foram seccionados para formar uma amostra composta destinada à carbonização.

As amostras foram secas em estufa e carbonizadas em um forno elétrico tipo mufla, seguindo a curva teórica de carbonização (Tabela 2). Após cada carbonização, o rendimento gravimétrico em carvão foi calculado, e uma parte das amostras carbonizadas foi reservada para avaliação da composição química imediata.

Tabela 2. Rampa de aquecimento utilizada na carbonização dos genótipos de *Eucalyptus* e *Corymbia*

Tempo (minutos)	Temperatura (°C)	Taxa de aquecimento (°C/minutos)
00	150	-
60	200	3,33
60	250	4,17
90	350	3,89
90	400	4,44
60	450	5,00

Para a obtenção da composição química imediata, formada pelo teor de material volátil, cinzas e carbono fixo, foi utilizada a Norma Brasileira - NBR – 8112, Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1986).

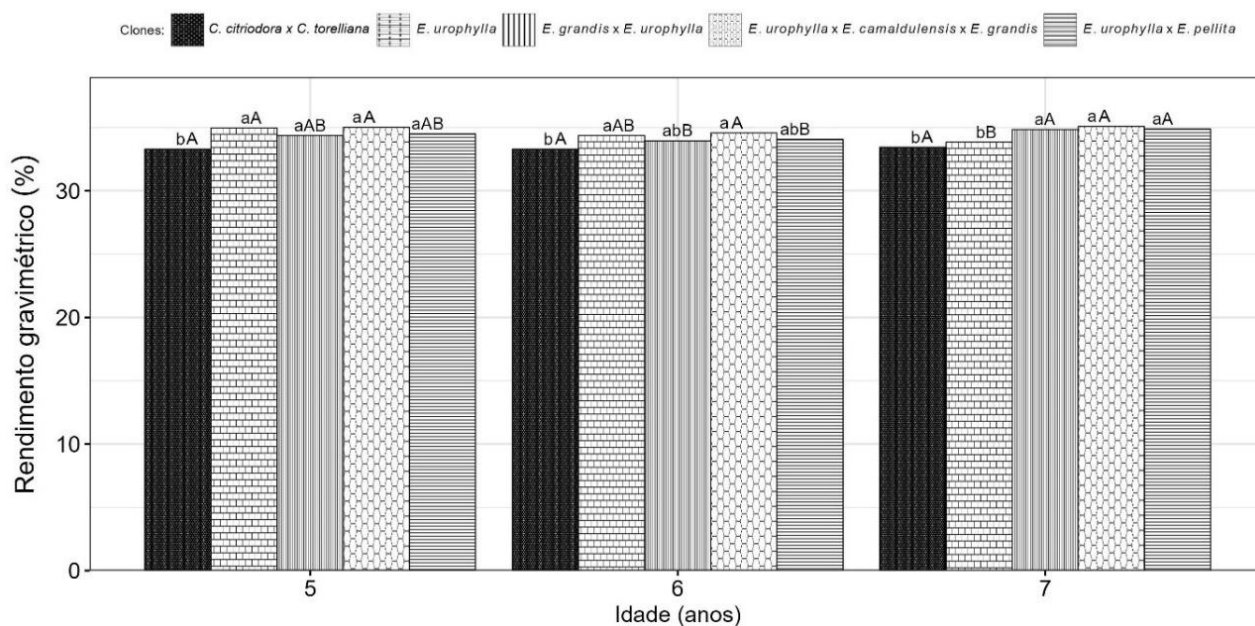
O experimento foi instalado em esquema fatorial com delineamento inteiramente casualizado. Atendendo aos pressupostos, os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA), para verificar interação entre os fatores. Além disso, foram utilizados testes de média (Tukey a 95% de probabilidade). Todas as análises foram realizadas no software livre R (R CORE TEAM, 2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Rendimento gravimétrico do carvão vegetal

A análise de variância revelou uma interação significativa entre a idade das árvores e o clone em relação ao rendimento gravimétrico de carvão vegetal. Os valores médios para cada tratamento são mostrados na Figura 1.

Figura 1. Rendimento gravimétrico (%) de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores.



Em que: Médias seguidas da mesma letra, minúscula entre clones e maiúsculas entre idades, não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey.;

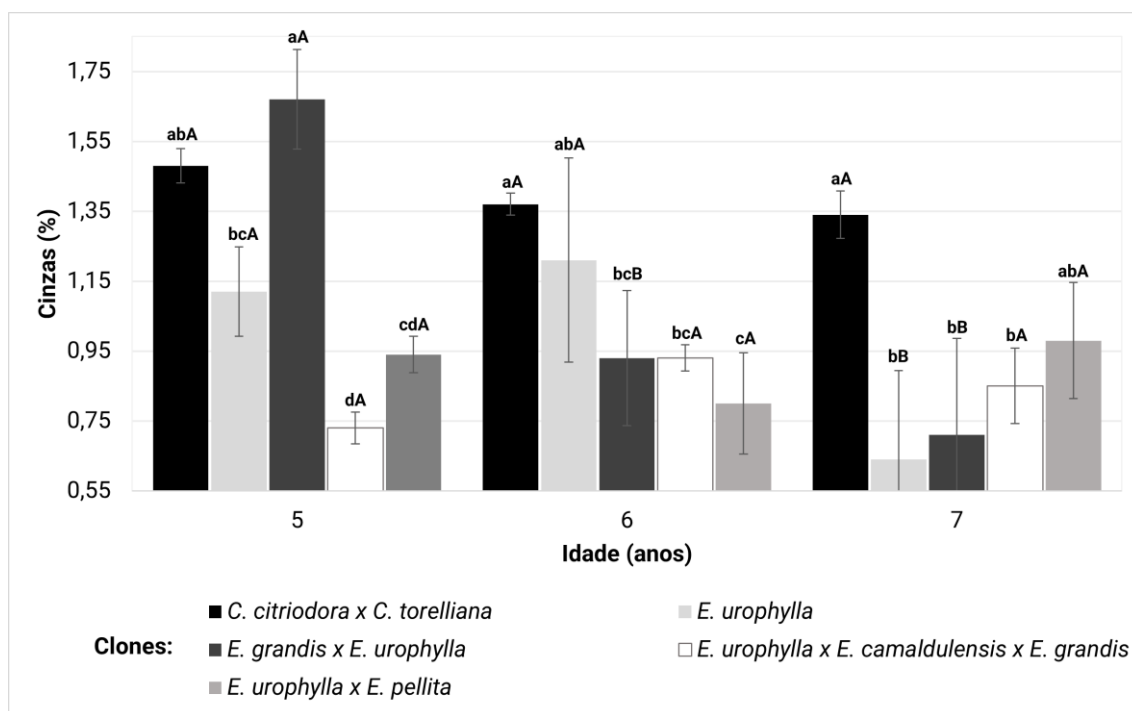
Após analisar o rendimento gravimétrico do clone, observou-se que somente o *Corymbia citriodora x C. torelliana* apresentou valores inferiores em carvão vegetal. Embora tenha maior densidade básica, possui maiores teores de holoceluloses na madeira (Loureiro et al., 2019; Menucelli et al., 2019), o que pode reduzir o rendimento gravimétrico em carvão vegetal, devido à fácil degradação dos carboidratos durante a carbonização (Loureiro et al., 2019).

Já os clones *E. urophylla*, *E. grandis x E. urophylla*, *E. urophylla x E. camaldulensis x E. grandis* e *E. urophylla x E. pellita* tiveram os maiores rendimentos gravimétricos em carvão vegetal, provavelmente devido à maior cristalinidade da celulose e maior teor de lignina total, características que se correlacionam positivamente com o rendimento gravimétrico em carvão vegetal (Coelho, 2015).

3.2. Teor de cinzas do carvão vegetal

A análise de variância revelou uma interação significativa entre a idade das árvores e o clone em relação ao teor de cinzas de carvão vegetal. Os valores médios para cada tratamento são mostrados na Figura 2.

Figura 2. Teor de cinzas (%) do carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores.



Em que: Médias seguidas da mesma letra, minúsculas entre clones e maiúsculas entre idades, não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey;

A idade de colheita das árvores afetou o teor de cinzas do carvão vegetal principalmente nos clones *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Em geral, observou-se uma tendência de redução no teor de cinzas com o aumento da idade, especialmente entre seis e sete anos, embora sem diferença significativa.

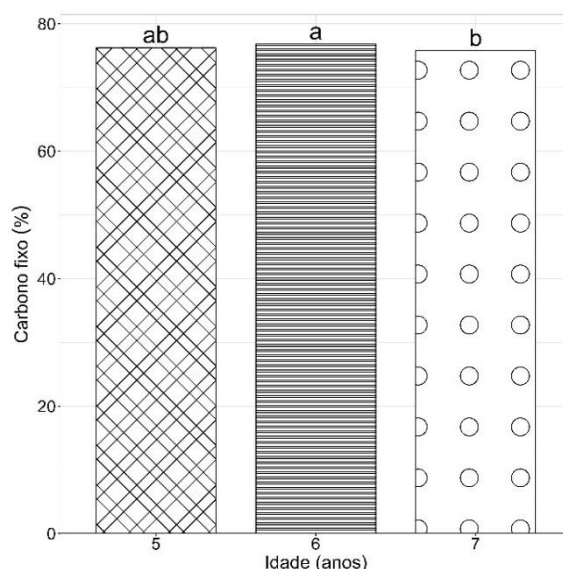
Segundo Canal et al. (2020), o ideal é que o teor de cinzas seja inferior a 5%, mas para a indústria siderúrgica o limite recomendado é de 1% (Santos et al., 2011). Este valor foi alcançado aos sete anos de idade, exceto para o clone *Corymbia citriodora* x *C. torelliana*.

As cinzas reduzem o poder calorífico, causam desgaste no alto forno e afetam negativamente a qualidade do aço devido ao acúmulo de minerais óxidos, aumentando o risco de trincas e fissuras nas ligas metálicas (Silva; Ataíde, 2019).

3.3. Carbono fixo e materiais voláteis do carvão vegetal

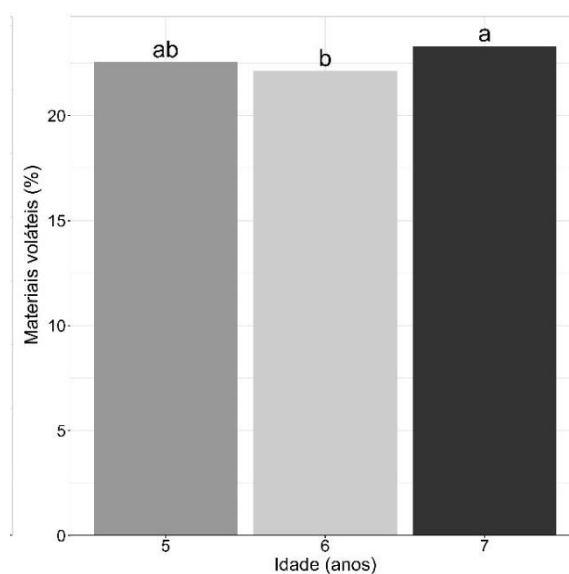
A análise de variância revelou uma interação isolada da idade de corte das árvores no teor de carbono fixo e materiais voláteis de carvão vegetal. Os valores médios para cada tratamento são mostrados nas Figuras 3 e 4.

Figura 3. Carbono fixo (%) do carvão vegetal de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores.



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey, para cada variável.

Figura 4. teor de materiais voláteis (%) do carvão vegetal de diferentes clones de *Eucalyptus* e *Corymbia* em função da idade de corte das árvores



Em que: Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si, a 95% de probabilidade, pelo teste de Tukey, para cada variável.

Similarmente ao estudo conduzido por Ramos et al. (2023), os teores de carbono fixo e voláteis do carvão vegetal não variaram muito entre os clones, permanecendo dentro da faixa recomendada de 75% a 80%. Um maior teor de carbono fixo resulta em menor volume ocupado pelo carvão no alto forno durante a redução do minério de ferro, reduzindo o consumo específico do redutor e aumentando a produtividade do alto forno (Fialho et al., 2019). Para o material volátil, o valor desejado na indústria siderúrgica é de no máximo 25% (Castro et al., 2016), e todos os clones permaneceram dentro desse limite, independentemente da idade.

O teor de carbono fixo aumentou em 1% da idade de cinco para seis anos, seguido de uma redução aos sete anos. Já o teor de material volátil diminuiu da idade cinco para seis anos e aumentou levemente da idade seis para sete, aproximadamente 6%.

4. CONCLUSÕES

- A propriedade mais afetada pela idade de corte dos indivíduos foi o teor de cinza do carvão vegetal que reduziu conforme aumentava a idade.
- O clone *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* atingiu o maior rendimento gravimétrico em carvão vegetal.
- Entre as idades, a que obteve os maiores valores de rendimento gravimétrico em carvão vegetal foi a idade de sete anos.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Florestal, ao Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM), a Universidade Federal de Viçosa, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Sociedade de Investigações Florestais, à EMBRAPA Unidade Fibras Florestais, à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas contribuições.

6. REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: Carvão vegetal: Análise imediata**. Rio de Janeiro. 1986.

BORGES, Marcus Vinicius Vieira. **Seleção de clones de eucalipto por meio da curva de crescimento: idade técnica de corte, idade de aceleração máxima e produtividade máxima**. 2023. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2023.

CANAL, W. D.; CARVALHO, A. M. M.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. de C. O.; FIALHO, L. de F.; DONATO, D. B. Impact of Wood Moisture in Charcoal Production and Quality. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 1, 2020. a.

CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. de C. O.; SANTOS, R. C. Dos; CARVALHO, A. M. M. L.; TRUGILHO, P. F.; MELO, I. C. N. A. De. Correlations between age, wood quality and charcoal quality of *eucalyptus* clones. **Revista Árvore**, v. 40, n. 3, p. 551–560, 2016.

COELHO, Priscila Dini. **Análise comparativa da idade de corte de plantações florestais com base em unidades volumétricas e gravimétricas**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2015.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL: Ano base 2021. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 13 de junho de 2022.

FIALHO, L. F.; CARNEIRO, A. C. O.; FIGUEIRÓ, C. G.; CARNEIRO, A. P. S.; SURDI, P. G.; VITAL, B. R.; MAGALHÃES, M. A.; PERES, L. C. Application of thermogravimetric analysis as a pre-selection tool for *Eucalyptus* spp. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, p. 1–9, 2019.

GAVRILESCU, D. Energy from biomass in pulp and paper mills. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 7, n. 5, p. 537–546, 2008.

HURTEAU, M. D.; NORTH, Ma. P.; KOCH, G. W.; HUNGATE, B. A. Opinion: Managing for disturbance stabilizes forest carbon. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 21, p. 10193–10195, 2019.

LOUREIRO, B. A.; VIEIRA, T. A. S.; COSTA, L. Ju.; SILVA, A. Ba.; ASSIS, M. R. De; TRUGILHO, P. F. Selection of superior clones of *Corymbia* hybrids based on wood and charcoal properties. **Maderas. Ciencia y tecnología**, n. ahead, p. 0–0, 2019.

MENUCELLI, J. R.; AMORIM, E. P.; FREITAS, M. L. M.; ZANATA, M.; CAMBUIM, J.; MORAES, M. L. T.; YAMAJI, F. M.; SILVA JÚNIOR, F. G.; LONGUI, E. L. Potential of *Hevea brasiliensis* Clones, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus tereticornis* Wood as Raw Materials for Bioenergy Based on Higher Heating Value. **Bioenergy Research**. v. 12, p-992-999, 2019.

PROTÁSIO, T. P.; ROQUE LIMA, M. D.; SCATOLINO, M. V.; SILVA, A. B.; RODRIGUES DE FIGUEIREDO, I. C.; GHERARDI HEIN, P. R.; TRUGILHO, P. F. Charcoal productivity and quality parameters for reliable classification of *Eucalyptus* clones from Brazilian energy forests. **Renewable Energy**, v. 164, p. 34–45, 2021.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria, 2023. Disponível em: <https://www.r-project.org/>.

RAMOS, D. C.; CARNEIRO, A. de C. O.; SIQUEIRA, H. F. De; OLIVEIRA, A. C.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira e do carvão vegetal de quatro clones de *Eucalyptus* com idades entre 108 e 120 meses. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 1, p. e48302, 2023.

SANTOS, R. C. Dos; CARNEIRO, A. de C. O.; CASTRO, A. F. N. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M. De; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, v. 39, n. 90, p. 221–230, 2011.

SILVA, F. T. M.; ATAÍDE, C. H. Valorization of *eucalyptus urograndis* wood via carbonization: Product yields and characterization. **Energy**, v. 172, p. 509–516, 2019.

ZHANG, X.; CHEN, J.; DIAS, A. C.; YANG, H. Improving Carbon Stock Estimates for In-Use Harvested Wood Products by Linking Production and Consumption—A Global Case Study. **Environmental Science & Technology**, v. 54, n. 5, p. 2565–2574, 2020.