

Silvicultura de Precisão e Economia Circular: O Uso de Geotecnologias para Otimizar o Aproveitamento Energético de Resíduos e Mitigar a Degradação Florestal

Precision Forestry and Circular Economy: The Use of Geotechnologies to Optimize Energy Recovery from Residues and Mitigate Forest Degradation
Silvicultura de Precisión y Economía Circular: El Uso de Geotecnologías para Optimizar el Aprovechamiento Energético de Residuos y Mitigar la Degradación Forestal

Rafael Rocha Leitão

Afiliação: Faculdade de Engenharia Florestal, UFRA, Pará, Brasil

E-mail institucional: rafael.leitao@discente.ufra.edu.br

RESUMO (PORTUGUÊS):

O estudo analisa, por meio de uma revisão integrativa, a convergência entre silvicultura de precisão, geotecnologias e economia circular para otimizar o aproveitamento energético de resíduos florestais e mitigar a degradação. A literatura aponta que, embora os resíduos de colheita sejam vitais para a bioenergia, sua remoção intensiva gera riscos edáficos e ecológicos. Os resultados demonstram que geotecnologias (LiDAR, SIG, sensoriamento remoto) permitem mapear estoques de biomassa e restrições ambientais, fundamentando decisões de manejo espacialmente explícitas. A análise indica que a aplicação de diretrizes de remoção parcial, ajustadas à variabilidade do sítio, reduz impactos negativos, transformando os resíduos em ferramentas de manejo sustentável ao invés de vetores de degradação. Conclui-se que a integração dessas abordagens desloca o foco da maximização volumétrica para a extração estratégica ("fração certa no lugar certo"), alinhando eficiência bioenergética com a conservação dos serviços ecossistêmicos.

Palavras-chave: Silvicultura de precisão; Economia circular; Resíduos florestais; Geotecnologias; Bioenergia.

ABSTRACT (ENGLISH):

This study analyzes, through an integrative review, the convergence between precision forestry, geotechnologies, and the circular economy to optimize the energy use of forest residues and mitigate degradation. Literature indicates that while harvest residues are vital for bioenergy, their intensive removal poses edaphic and ecological risks. Results demonstrate that geotechnologies (LiDAR, GIS, remote sensing) allow for mapping biomass stocks and environmental constraints, supporting spatially explicit management decisions. The analysis indicates that applying partial removal guidelines, adjusted to site variability, reduces negative impacts, turning residues into sustainable management tools rather than vectors of degradation. It is concluded that integrating these approaches shifts the focus from volumetric maximization to strategic extraction ("right fraction in the right place"), aligning bioenergy efficiency with the conservation of ecosystem services.

Keywords: Precision forestry; Circular economy; Forest residues; Geotechnologies; Bioenergy.

RESUMEN (ESPAÑOL):

El estudio analiza, mediante una revisión integradora, la convergencia entre silvicultura de precisión, geotecnologías y economía circular para optimizar el uso energético de residuos forestales y mitigar la degradación. La literatura señala que, aunque los residuos de cosecha son vitales para la bioenergía, su extracción intensiva genera riesgos edáficos y ecológicos. Los resultados demuestran que las geotecnologías (LiDAR, SIG, teledetección) permiten mapear existencias de biomasa y restricciones ambientales, fundamentando decisiones de manejo espacialmente explícitas. El análisis indica que la aplicación de directrices de extracción parcial, ajustadas a la variabilidad del sitio, reduce impactos negativos, transformando los residuos en herramientas de manejo

sostenible en lugar de vectores de degradación. Se concluye que la integración de estos enfoques desplaza el foco de la maximización volumétrica hacia la extracción estratégica ("fracción correcta en el lugar correcto"), alineando la eficiencia bioenergética con la conservación de los servicios ecosistémicos.

Palabras clave: Silvicultura de precisión; Economía circular; Residuos forestales; Geotecnologías; Bioenergía.

1. INTRODUÇÃO

A expansão da bioenergia de base florestal é um dos eixos da transição energética e da bioeconomia em diversos países, especialmente na Europa e na América Latina (STEGMANN, 2020; LAZARIDOU, 2021). No setor florestal, resíduos de colheita - galhos, copas, ponteiros, cascas e árvores defeituosas - representam um estoque significativo de biomassa, com potencial para substituir combustíveis fósseis e contribuir para a redução de emissões de gases de efeito estufa (LÓPEZ-RODRÍGUEZ, 2009; LATTIMORE, 2009).

Em paralelo, a economia circular, aplicada à cadeia florestal, propõe a maximização do valor de biomassa e materiais ao longo do tempo, priorizando o uso em cascata (produtos de maior valor, reuso, reciclagem e, por fim, energia) e a redução das perdas nos processos produtivos (STEGMANN, 2020; LAZARIDOU, 2021). Nesse contexto, o uso energético de resíduos não é uma solução isolada, mas um componente de arranjos circulares mais amplos, envolvendo manejo florestal, indústria madeireira e cadeias de bioenergia.

A silvicultura de precisão surge como abordagem capaz de integrar dados de sensoriamento remoto, LiDAR, GNSS e sistemas de informação geográfica (SIG) para apoiar decisões de manejo espacialmente explícitas - desde inventário e planejamento de colheita até a logística de remoção de resíduos (CORONA, 2017). Ao permitir a previsão da quantidade e distribuição de resíduos, bem como a modelagem de acessibilidade, declividade, fragilidade do solo e sensibilidade ecológica, essas ferramentas reduzem a incerteza sobre a oferta sustentável de biomassa (BOUDREAU, 2008; COOPS, 2016; SCHNEIDER, 2017).

No entanto, a literatura ainda é fragmentada: parte dos estudos foca nos aspectos energéticos e logísticos, outra parte nos impactos ecológicos da remoção de resíduos, e uma terceira discute circularidade e bioeconomia de forma macro, sem necessariamente integrar geotecnologias e manejo florestal operacional (LATTIMORE, 2009; THIFFAULT, 2015; TITUS, 2021; LAZARIDOU, 2021). Falta uma análise integrativa que trate simultaneamente de: (i) silvicultura de precisão, (ii) economia circular e (iii) mitigação de degradação florestal via uso energético de resíduos.

O objetivo deste estudo é analisar, em uma perspectiva de revisão integrativa, como a silvicultura de precisão e o uso de geotecnologias têm sido empregados para otimizar o aproveitamento energético de resíduos florestais dentro de estratégias de economia circular, discutindo em que medida essas abordagens contribuem para mitigar (ou intensificar) a degradação florestal.

2. METODOLOGIA

2.1 Tipo de estudo

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, estruturada para combinar evidências conceituais, metodológicas e empíricas sobre silvicultura de precisão, geotecnologias, resíduos florestais, bioenergia e economia circular.

2.2 Bases de dados e estratégias de busca

Foram consultadas as seguintes bases de dados: Web of Science, Scopus, ScienceDirect, SciELO, SpringerLink e periódicos de acesso aberto (MDPI, BMC, entre outros). A busca também foi complementada por Google Scholar para identificar artigos de acesso aberto em periódicos florestais específicos.

Strings de busca (em inglês e português) incluíram combinações de: "precision forestry" AND (GIS OR LiDAR OR remote sensing); "forest residues" AND (bioenergy OR bioenergy potential) AND (GIS OR geospatial); "forest biomass" AND "logging residues" AND (sustainability OR guidelines); "circular bioeconomy" AND forestry; "economia circular" AND "setor florestal"; "resíduos florestais" AND (energia OR bioenergia) AND (SIG OR sensoriamento remoto).

2.3 Critérios de inclusão e exclusão

Inclusão: Artigos originais ou de revisão, revisados por pares; Publicados entre 2000 e 2024; Tratando de ao menos um dos eixos centrais: (a) silvicultura de precisão / geotecnologias em manejo florestal, (b) quantificação de resíduos florestais para bioenergia com abordagem espacial, ou (c) economia circular/bioeconomia no setor florestal.

Exclusão: Estudos exclusivamente agronômicos ou urbanos sem relação com resíduos florestais madeireiros; Trabalhos que abordassem apenas plantios energéticos dedicados, sem discussão de resíduos.

Após leitura de títulos, resumos e, posteriormente, texto completo, foram selecionados artigos que representassem diferentes combinações entre geotecnologias, planejamento energético de resíduos e enquadramento em bioeconomia circular.

2.4 Extração e síntese dos dados

Para cada artigo incluído, foram extraídas informações sobre: Contexto (região, tipo de floresta, sistema de manejo); Geotecnologias empregadas (sensoriamento remoto, LiDAR, SIG, modelos de simulação); Indicadores energéticos (quantidade de biomassa, poder calorífico, potencial energético); Indicadores ambientais e de degradação (erosão, nutrientes, carbono, biodiversidade, regeneração); Conexão explícita com economia circular ou bioeconomia.

Os estudos foram então organizados em eixos temáticos e sintetizados qualitativamente, com destaque para aqueles apresentados na Tabela 1.

3. RESULTADOS

3.1 Conceitos de silvicultura de precisão e economia circular no setor florestal

A silvicultura de precisão é definida como o uso sistemático de dados espaciais e temporais de alta resolução - oriundos de inventário de campo, sensores remotos, LiDAR e modelos - para ajustar práticas de manejo ao nível de talhão, subtalhão ou árvore individual, aumentando eficiência produtiva e reduzindo incertezas (CORONA, 2017). Essa abordagem inclui mapeamento de estoques de madeira, topografia, solos, infraestrutura viária e restrições ambientais, compondo uma base geoespacial para tomada de decisão.

Do ponto de vista macroeconômico, a economia circular de base biológica propõe a manutenção do valor da biomassa ao longo de ciclos de uso, com ênfase em hierarquias de uso (cascading use), sinergias entre cadeias produtivas e redução de desperdício (STEGMANN, 2020).

No setor florestal, isso se traduz em estratégias de uso em cascata da madeira e de seus derivados, nas quais energia a partir de resíduos ocupa o último degrau, após aproveitamento para produtos de maior valor agregado, reaproveitamento e reciclagem (LAZARIDOU, 2021).

Lazaridou (2021) mostra que a circularidade baseada em florestas envolve trade-offs ambientais e econômicos, por exemplo, entre a maximização do uso de resíduos e a manutenção de funções ecossistêmicas, e destaca a necessidade de indicadores integrados que incorporem serviços ecossistêmicos e externalidades negativas.

3.2 Geotecnologias na quantificação de biomassa e resíduos florestais

Estudos clássicos demonstram que dados LiDAR aerotransportados podem estimar biomassa aérea com elevada precisão em escala regional, permitindo o mapeamento espacial de estoques e a derivação de variáveis estruturais relevantes para manejo (BOUDREAU, 2008). Da mesma forma, índices de estrutura de habitat baseados em LiDAR contribuem para integrar conservação da biodiversidade e planejamento florestal (COOPS, 2016), enquanto produtos de sensoriamento remoto multiespectral permitem mapear atributos funcionais da vegetação, como diversidade funcional de copas (SCHNEIDER, 2017).

No contexto do aproveitamento energético de resíduos, López-Rodríguez (2009) emprega SIG e dados de inventário florestal para quantificar e mapear o potencial de bioenergia proveniente de resíduos florestais na província de Cáceres, Espanha. O estudo estima 463 000 t ano⁻¹ de resíduos, resultando em potencial energético de aproximadamente 5,8 milhões de GJ ano⁻¹, mas mostra que o potencial técnico é significativamente menor quando se consideram restrições de declividade, acessibilidade e sustentabilidade (LÓPEZ-RODRÍGUEZ, 2009).

Em cenário brasileiro, Prates (2023) avalia propriedades combustíveis de resíduos de *Eucalyptus saligna* e *E. urophylla* × *E. grandis* recuperados da colheita de árvores inteiras em diferentes cenários de diâmetro mínimo para produção de cavacos. O estudo indica variações importantes em umidade, cinzas e poder calorífico dos resíduos conforme o tratamento de colheita, com valores de poder calorífico inferior adequados ao uso energético e sensibilidade das cinzas ao padrão de remoção de biomassa (PRATES, 2023).

3.3 Diretrizes para remoção sustentável de resíduos e riscos de degradação florestal

Revisões abrangentes destacam que a remoção intensiva de resíduos (galhos, copas, raízes finas) pode levar à redução dos estoques de nutrientes do solo, aumento da acidez, maior risco de erosão e perda de matéria orgânica, especialmente em sítios pobres ou declivosos (LATTIMORE, 2009; THIFFAULT, 2015). Lattimore (2009) sintetiza fatores ambientais críticos na produção de lenha e biomassa, propondo indicadores de sustentabilidade para práticas de colheita de resíduos, incluindo limites à proporção de biomassa removida e à frequência de extração em rotações sucessivas.

Thiffault (2015) revisa taxas de recuperação de resíduos em florestas boreais e temperadas, encontrando taxas típicas de 30% a 70% do potencial teórico, em função de restrições técnicas, econômicas e ambientais. A autora enfatiza que o “gap” entre potencial teórico e explorável

deve ser encarado como margem de segurança ecológica, e não apenas como perda de oportunidade energética (THIFFAULT, 2015).

Em complementaridade, Titus (2021) analisa diretrizes de colheita de resíduos em diferentes jurisdições, mostrando que parte dos países/estados adota regras explícitas para retenção de resíduos em função de solos sensíveis, inclinações e objetivos de conservação, ao passo que outros operam com recomendações pouco específicas. O trabalho conclui que a harmonização entre metas de bioenergia e critérios ecológicos exige diretrizes que levem em conta variabilidade espacial de sítio, regime de manejo e tipo de resíduo (TITUS, 2021).

Por outro lado, Hueso-González (2018) demonstra que a adição de resíduos de desbaste em áreas de montanha mediterrânea pode melhorar a cobertura do solo, reduzir erosão e favorecer a regeneração da vegetação, quando manejada em quantidades e arranjos espaciais adequados. Isso reforça que resíduos podem atuar tanto como fator de degradação quanto como ferramenta de restauração, dependendo do contexto e do desenho do manejo (HUESO-GONZÁLEZ, 2018).

3.4 Economia circular de base florestal e hierarquia de usos

Stegmann (2020) define a bioeconomia circular como arranjo em que o uso de recursos biológicos é guiado pelos princípios de redução, reutilização, reciclagem e recuperação, articulados em cadeias de valor regionais. No caso de biomassa florestal, a aplicação dessa lógica implica priorizar usos de maior valor agregado (madeira serrada, produtos engenheirados, química verde) e destinar resíduos não reaproveitáveis para energia, fechando ciclos de carbono e reduzindo a dependência de fósseis (STEGMANN, 2020).

Lazaridou (2021), ao revisar literatura sobre economia circular florestal, destaca que o uso energético de resíduos se justifica quando: substitui fontes fósseis de maior intensidade de carbono; não compromete funções críticas de solo e biodiversidade; e se insere em cadeias regionais que mantêm parte significativa do valor econômico e social nas comunidades envolvidas.

A autora ressalta, contudo, lacunas na mensuração de custos ambientais indiretos (por exemplo, emissões associadas ao transporte de biomassa) e na integração de indicadores ecossistêmicos em modelos de negócio circulares (LAZARIDOU, 2021).

3.5 Síntese dos estudos-chave

A Tabela 1 resume alguns dos principais estudos identificados e seus desfechos centrais em relação à silvicultura de precisão, economia circular e aproveitamento energético de resíduos.

TABELA 1 - Estudos selecionados sobre silvicultura de precisão, resíduos florestais e economia circular.

Autor/Ano	Título	Principais desfechos
CORONA, 2017	Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia	Define silvicultura de precisão, descrevendo o uso de LiDAR, SIG e sensores para planejamento de manejo florestal de alta resolução.
LATTIMORE, 2009	Environmental factors in woodfuel production: opportunities, risks, and criteria and indicators for sustainable practices	Revisa riscos ecológicos da produção de lenha e biomassa; propõe indicadores de sustentabilidade para remoção de resíduos.
THIFFAULT, 2015	Recovery rate of harvest residues for bioenergy in boreal and temperate forests: a review	Apresenta faixas típicas de recuperação de resíduos e discute o “gap” entre potencial teórico e recuperável como margem ecológica.
TITUS, 2021	Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines	Compara diretrizes de remoção de resíduos em vários países, apontando convergências e lacunas na incorporação de critérios ecológicos.
LÓPEZ-RODRÍGUEZ, 2009	Spatial assessment of the bioenergy potential of forest residues in the western province of Spain, Caceres	Usa SIG para mapear o potencial de bioenergia de resíduos, demonstrando forte redução do potencial quando aplicadas restrições ambientais.
PRATES, 2023	Fuel properties of forest residues recovered from full eucalyptus tree harvesting in different chip production scenarios	Caracteriza propriedades energéticas de resíduos de eucalipto sob diferentes cenários de colheita, evidenciando variações de umidade e cinzas.
STEGMANN, 2020	The circular bioeconomy: its elements and role in European bioeconomy clusters	Conceitua bioeconomia circular e hierarquia de usos da biomassa; discute o papel dos resíduos florestais em clusters regionais.
LAZARIDOU, 2021	Exploring environmental and economic costs and benefits of a forest-based circular economy: a literature review	Sintetiza custos e benefícios da economia circular florestal, destacando lacunas em indicadores ambientais e socioeconômicos.
BOUDREAU, 2008	Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec	Demonstra capacidade do LiDAR para mapear biomassa aérea em escala regional, base para estimar disponibilidade de resíduos.
HUESO-GONZÁLEZ, 2018	Benefits of adding forestry clearance residues for the soil and vegetation of a Mediterranean mountain forest	Mostra que a adição controlada de resíduos pode reduzir erosão e favorecer vegetação, reforçando a importância de limiares de manejo.

Fonte: elaborado pelo autor, 2025.

4. DISCUSSÕES

4.1 Integração entre silvicultura de precisão e economia circular

Enquanto Corona (2017) apresenta a silvicultura de precisão principalmente como vetor de aumento de eficiência na produção florestal por meio de geotecnologias, Stegmann (2020) e Lazaridou (2021) enfatizam a necessidade de enquadrar qualquer intensificação produtiva dentro de um quadro de circularidade, que impõe limites ecológicos e hierarquias de uso.

Na prática, isso significa que o mesmo aparato tecnológico - LiDAR, SIG, sensoriamento remoto - que permite localizar com precisão estoques de resíduos, também deve ser usado para mapear zonas de retenção obrigatória, áreas com solos frágeis, encostas suscetíveis à erosão e habitats de alto valor de conservação (BOUDREAU, 2008; COOPS, 2016; SCHNEIDER, 2017). A decisão de remover ou manter resíduos passa a depender não apenas de quantidades médias por hectare, mas de padrões espaciais finos de risco e resiliência.

Sob esse prisma, o aproveitamento energético de resíduos deixa de ser apenas uma questão de “quanto posso retirar?” e passa a ser “quais frações espaciais podem ser retiradas sem comprometer funções ecossistêmicas, e em que rotações?”. Os trabalhos de Lattimore (2009), Thiffault (2015) e Titus (2021) sugerem que a resposta ótima é fortemente dependente de solo, clima, espécie e regime de manejo; logo, é inerentemente espacial - o que reforça o papel da silvicultura de precisão.

4.2 Resíduos florestais entre mitigação e intensificação da degradação

Há uma tensão central na literatura: de um lado, a remoção intensiva de resíduos pode acelerar a depleção de nutrientes, aumentar erosão e comprometer a reposição de carbono no solo, especialmente em sítios marginais (LATTIMORE, 2009; THIFFAULT, 2015). De outro, a manutenção de grandes volumes de resíduos em superfície pode elevar o risco de incêndios de alta severidade, dificultar operações de plantio e desbaste e, em alguns contextos, favorecer pragas (LATTIMORE, 2009; TITUS, 2021).

Hueso-González (2018) mostra um ponto intermediário: a incorporação planejada de resíduos de desbaste, em vez de remoção completa ou abandono aleatório, pode proteger o solo e beneficiar a vegetação. Isso sugere que o problema não é “resíduo sim ou não”, mas “quanto, onde e em que arranjo estrutural”, o que remete à necessidade de critérios espaciais.

Enquanto López-Rodríguez (2009) demonstra que a aplicação de restrições geográficas (declividade, distância a estradas, limitações de uso do solo) reduz drasticamente o potencial de

bioenergia de resíduos, Titus (2021) mostra que muitas diretrizes ainda são definidas em termos médios (por exemplo, proporção da biomassa removida por talhão), sem incorporar plenamente essa heterogeneidade espacial. A silvicultura de precisão oferece justamente o elo que falta entre diretrizes gerais e implementação localizada.

4.3 Propriedades energéticas e implicações operacionais

Os resultados de Prates (2023) indicam que diferentes cenários de colheita de árvores inteiras alteram significativamente a umidade e o teor de cinzas dos resíduos, embora os valores de poder calorífico se mantenham em faixa compatível com uso energético. Na prática, isso implica que a definição de diâmetros mínimos de corte e de quais compartimentos da árvore são removidos ou deixados no campo impacta simultaneamente: o balanço de nutrientes (por exemplo, mais casca e folhas removidas → mais exportação de nutrientes), o desempenho energético (umidade, cinzas, poder calorífico) e a logística (volumes, densidade aparente, custo de transporte).

Quando combinados a modelos espaciais de oferta (LÓPEZ-RODRÍGUEZ, 2009) e a diretrizes de colheita baseadas em critérios ecológicos (LATTIMORE, 2009; TITUS, 2021), esses resultados sugerem que a política ótima não é maximizar o volume de resíduos retirados, mas selecionar frações com melhor relação entre qualidade energética, risco ecológico e custo logístico.

4.4 Limitações do corpo de evidências e desta revisão

Duas limitações são recorrentes nos estudos analisados: poucos trabalhos integram, em um mesmo modelo, indicadores energéticos (potencial de MWh), ambientais (nutrientes, erosão, carbono) e socioeconômicos (aceitação de proprietários, empregos, renda local), como ressalta Lazaridou (2021); e boa parte das análises se concentra em casos de estudo regionais (Espanha, Canadá, cenários específicos de eucalipto no Brasil), o que dificulta transferir diretamente limiares de sustentabilidade entre biomas (LÓPEZ-RODRÍGUEZ, 2009; PRATES, 2023).

Em relação à presente revisão, as principais limitações residem: no recorte temporal e linguístico (priorização de publicações em inglês e português entre 2000 e 2024); na exclusão de documentos sem DOI, o que pode ter suprimido parte de diretrizes técnicas nacionais; na natureza qualitativa da síntese, sem metanálises quantitativas de impactos ecológicos.

Ainda assim, o conjunto de evidências é suficiente para delinear princípios operacionais robustos para uma silvicultura de precisão alinhada à economia circular.

5. CONCLUSÃO

A revisão integrativa indica que a convergência entre silvicultura de precisão, geotecnologias e economia circular permite transformar o aproveitamento energético de resíduos de um vetor potencial de degradação em uma ferramenta de mitigação de riscos, desde que obedecidos critérios espaciais, ecológicos e de uso em cascata.

Os estudos analisados mostram que geotecnologias (LiDAR, SIG, sensoriamento remoto) viabilizam estimativas espacialmente explícitas de biomassa e resíduos, além de mapear restrições ambientais relevantes (CORONA, 2017; BOUDREAU, 2008; COOPS, 2016; SCHNEIDER, 2017); a aplicação de diretrizes de remoção parcial de resíduos, baseadas em solos, declividade e objetivos de conservação, reduz o risco de degradação, ainda que diminua o potencial energético explorável (LATTIMORE, 2009; THIFFAULT, 2015; TITUS, 2021; HUESO-GONZÁLEZ, 2018); propriedades energéticas dos resíduos variam com o sistema de colheita, devendo ser consideradas conjuntamente com impactos ecológicos e custos logísticos (PRATES, 2023); a economia circular de base florestal fornece o arcabouço conceitual para hierarquizar usos e evitar que a busca por biomassa energética comprometa funções ecossistêmicas e benefícios socioeconômicos de longo prazo (STEGMANN, 2020; LAZARIDOU, 2021).

Na prática, os resultados sugerem as seguintes diretrizes operacionais: incorporar rotineiramente camadas geográficas de produtividade, declividade, solos, rede viária e áreas sensíveis em modelos de oferta de resíduos, evitando decisões baseadas apenas em médias por talhão; adotar, como ponto de partida, faixas de recuperação de resíduos intermediárias - abaixo do potencial técnico máximo - ajustadas por tipo de sítio e regime de manejo, em consonância com as evidências sintetizadas por Thiffault (2015) e Titus (2021); priorizar resíduos com melhores propriedades energéticas e menor relevância ecológica (por exemplo, materiais já concentrados em pátios ou estradas de extração), deixando frações estrategicamente distribuídas no campo para proteção do solo e manutenção de habitat (HUESO-GONZÁLEZ, 2018; PRATES, 2023); alinhar projetos de bioenergia de resíduos a estratégias regionais de economia circular, garantindo que o valor econômico e social gerado permaneça nos territórios

produtores e que sejam monitorados não apenas fluxos de energia, mas também indicadores ambientais.

Em síntese, a silvicultura de precisão, quando acoplada a uma visão de economia circular, desloca o debate de “extrair o máximo de resíduos possível” para “extrair a fração certa, do lugar certo, no momento certo”, aumentando a probabilidade de que o uso energético de resíduos atue como mecanismo de mitigação da degradação florestal, e não como novo vetor de pressão sobre os ecossistemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CORONA, Piermaria; CHIANUCCI, Francesco; QUATRINI, Valerio; CIVITARESE, Vincenzo; CLEMENTEL, Fabrizio; COSTA, Corrado; FLORIS, Antonio; MENESATTI, Paolo; PULETTI, Nicola; SPERANDIO, Giulio; VERANI, Stefano; TURCO, Rosario; BERNARDINI, Vincenzo; PLUTINO, Manuela; SCRINZI, Gianfranco. Precision forestry: riferimenti concettuali, strumenti e prospettive di diffusione in Italia. *Forest@ - Rivista di Selvicultura ed Ecologia Forestale*, v. 14, n. 1, p. 1–12, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3832/efor2285-014>.

BOUDREAU, Joseph; NELSON, Ross F.; MARGOLIS, Hank A.; BEAUDOIN, Alain; GUINDON, Luc; KIMES, David S. Regional aboveground forest biomass using airborne and spaceborne LiDAR in Québec. *Remote Sensing of Environment*, v. 112, n. 10, p. 3876–3890, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.003>.

COOPS, Nicholas C.; HILKER, Thomas; WULDER, Michael A.; ST-ONGE, Benoit; NEWNHAM, Glenn; SIGGINS, Adam; BOGDA, Scott; NEILSON, Ethan T.; BALSILLIE, Dave; MCBRIDE, Ann; outros. A forest structure habitat index based on airborne laser scanning data. *Ecological Indicators*, v. 67, p. 346–357, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.02.057>.

HUESO-GONZÁLEZ, Paloma; MARTÍNEZ-MURILLO, Juan Francisco; RUIZ-SINOGA, José Damián. Benefits of adding forestry clearance residues for the soil and vegetation of a Mediterranean mountain forest. *Science of the Total Environment*, v. 615, p. 796–804, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.301>.

LATTIMORE, Bryan; SMITH, C. T.; TITUS, Brian D.; STUPAK, Inge; EGNELL, Gustaf. Environmental factors in woodfuel production: opportunities, risks, and criteria and indicators for sustainable practices. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 10, p. 1321–1342, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.06.005>.

LAZARIDOU, Dimitra C.; MICHAILIDIS, Anastasios; TRIGKAS, Marios. Exploring environmental and economic costs and benefits of a forest-based circular economy: a literature review. *Forests*, v. 12, n. 4, p. 436, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12040436>.

LÓPEZ-RODRÍGUEZ, Fernando; PÉREZ ATANET, Carmen; CUADROS BLÁZQUEZ, Francisco; RUIZ CELMA, Antonio. Spatial assessment of the bioenergy potential of forest residues in the western province of Spain, Caceres. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, n. 10, p. 1358–1366, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.05.026>.

PRATES, Eloise; LOPES, Eduardo da Silva; RODRIGUES, Carla Krulikowski; SILVA, Dimas Agostinho da; SILVA, Matheus Kaminski Cândido da. Fuel properties of forest residues recovered from full eucalyptus tree harvesting in different chip production scenarios. *Floresta*, v. 53, n. 3, p. 333–341, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5380/ufv.v53i3.83867>.

SCHNEIDER, Felix D.; MORSDORF, Felix; SCHMID, Bernhard; PETCHEY, Owen L.; HUENI, Andreas; SCHIMEL, David S.; SCHAEPMAN, Michael E. Mapping functional diversity from remotely sensed morphological and physiological forest traits. *Nature Communications*, v. 8, p. 1441, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01530-3>.

STEGMANN, Paul; LONDO, Marc; JUNGINGER, Martin. The circular bioeconomy: its elements and role in European bioeconomy clusters. *Resources, Conservation and Recycling X*, v. 6, p. 100029, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2019.100029>.

THIFFAULT, Evelyne; BÉCHARD, Ariane; PARÉ, David; ALLEN, Darren. Recovery rate of harvest residues for bioenergy in boreal and temperate forests: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, v. 4, n. 5, p. 429–451, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/wene.157>.

TITUS, Brian D.; BROWN, Kevin; HELMISAARI, Heljä-Sisko; VON WILPERT, Klaus; VÄÄNÄNEN, Riitta; BALAUSTEGUI, Susana; outros. Sustainable forest biomass: a review of current residue harvesting guidelines. *Energy, Sustainability and Society*, v. 11, n. 10, p. 1–28, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-021-00281-w>.