IX RPCS Reunião Paranaense de Ciência do Solo
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo Núcleo Estadual Paraná
UFPR Universidade Federal do Paraná

IMPACTO DO MANEJO DE RESÍDUOS DA COLHEITA E ADUBAÇÃO SOBRE O ACÚMULO DE CARBONO EM PLANTAÇÕES DE *PINUS TAEDA* L.

Franciele Alba[1], Josileia Acordi Zanatta[2*], Laura Cristiane Nascimento de Freitas[3]
[1]Bolsista da Embrapa Florestas; [2]Pesquisadora da Embrapa Florestas, *josileia.zanatta@embrapa.br; [3]Estudante de doutorado do PPG Ciência do Solo da UFPR

RESUMO

Durante a colheita, plantações de Pinus geram grandes quantidades de resíduos e recentemente tornou-se interessante usar esse material para cogeração de energia elétrica, em detrimento de estudos que indicam a necessidade de manter adição de resíduos para suprir a espécie florestal. Assim, o estudo objetivou avaliar como o manejo desses resíduos e a aplicação de fertilizantes de forma compensatória afetam o sequestro de carbono em plantações de *Pinus taeda* L. no Paraná. O experimento, realizado na Embrapa Florestas, incluiu quatro tratamentos com combinações de manejo de resíduos e adubação. A análise dos dados utilizou modelos de efeitos mistos lineares, considerando a correlação temporal dos dados. Resultados indicam que o tratamento com resíduo e fertilizante (R+F) maximizou o acúmulo de carbono. A pesquisa sugere que tanto o manejo de resíduos quanto o uso de fertilizantes contribuem significativamente para o sequestro de carbono.

PALAVRAS-CHAVE: solo; resíduo; fertilizante; carbono; floresta.

INTRODUÇÃO

O manejo adotado em florestas plantadas pode potencializar ou mitigar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) para a atmosfera. As florestas plantadas produzem grandes quantidades de resíduos vegetais, principalmente durante as operações de colheita, sendo compostos basicamente por galhos e cascas, (ponteiras e folhas) (Penna-Vergara, 2022).

A porcentagem da biomassa das espécies de pinus que se transforma em resíduos na colheita varia de acordo com o tipo de plantio e as condições de manejo (Daystar *et al*., 2012, Neumann *et al*., 2023). De maneira geral, pesquisas indicam que cerca de 20 a 40% da biomassa total de pinus pode ser composta por resíduos durante a colheita (Penna-Vergara, 2022). Especificamente, estudos mostram que, em plantios de Pinus *taeda* L., os resíduos podem chegar a 20,1% da biomassa total, incluindo sub-bosque (Daystar *et al*., 2012). Devido ao volume considerável, é fato que há um crescente interesse no uso dos resíduos da colheita para cogeração de energia por plantas industriais. Essa estratégia geralmente está vinculada a reposição de nutrientes pela fertilização da espécie florestal. Tanto a prática da retirada de resíduos, quanto a fertilização podem gerar um novo equilíbrio na relação solo-planta-atmosfera, impactando processos biológicos como a emissão de gases de efeito estufa e a dinâmica do carbono no solo. Dessa forma, pesquisas voltadas à investigar a retirada dos resíduos vegetais da colheita e como a fertilização pode compensar esse ausência, sobretudo na promoção do crescimento da própria floresta e na dinâmica do acúmulo de carbono n biomassa vegetal, são de grande interesse.

Neste contexto, o presente trabalho abordou a seguinte pergunta científica: C*omo práticas de manejo dos resíduos da colheita de pinus afetam a capacidade das florestas de sequestrar carbono ao longo do tempo?* Para responder essa pergunta, o objetivo da pesquisa foi avaliar a influência do manejo do resíduo remanescente pós-colheita e da aplicação de fertilizantes sobre os estoques de carbono em plantações comerciais de Pinus *taeda* L. no estado do Paraná, ao longo de um período de cinco anos.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido na área experimental pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Florestas), localizada no Município de Colombo, Paraná. O experimento foi instalado

em junho de 2019 com o plantio de mudas da espécie Pinus *taeda* L., após a colheita de um talhão de pinus de 35 anos de idade. Os tratamentos, que correspondem aos sistemas de manejo da área experimental, combinaram o manejo do resíduo da colheita (retenção ou remoção) com a adubação N-P-K (Nitrogênio – Fósforo - Potássio). Nos tratamentos com adubação, foram aplicados 50 kg. ha^{-1} de N, 60 kg. ha^{-1} de P_2O_5 e 60 kg. ha^{-1} de K_2O, conforme recomendação para a espécie florestal do estudo. A adubação de N foi dividida em 2 parcelas iguais aplicadas em 04/12/2019 e 04/03/2020. Os quatro tratamentos implementados no estudo foram: 1. Sem resíduo de colheita e sem fertilizante (sR-F); 2. Com resíduo de colheita (36 Mg MS/ha) e sem fertilizante (R-F); 3. Sem resíduo de colheita e com fertilizante (sR+F); 4. Com resíduo de colheita e com fertilizante (R+F). O delineamento experimental utilizado consistiu em blocos ao acaso, constituídos de três blocos. Cada parcela contempla 70 mudas de Pinus *taeda* L. dispostas no espaçamento de 2x3 m.

Após nove meses (0,75 anos) da implantação do experimento, houve a realização do primeiro inventário, seguido por novas medições aos 1,3; 1,8; 2,6; 3,25; 3,41; 4; 4,6 e 5,3 anos. Os primeiros levantamentos consideraram a mensuração da altura das árvores (em m) e o diâmetro do colo da muda (em cm). Após determinada idade em que as árvores atingiram mais de 1,30 metros do solo (1 ano após o plantio), aferições do Diâmetro a Altura do Peito (DAP) passaram a ser realizadas. Os levantamentos foram sempre realizados nas 18 árvores centrais de cada parcela. Com essas informações foi estimada a biomassa vegetal da parte aérea adotando a equação alométrica desenvolvida por Higa *et al*. (2005) para a mesma espécie. O estoque de carbono foi estimado considerando 47% da biomassa vegetal.

Objetivando analisar os dados coletados e considerando a complexidade da estrutura hierárquica dos dados concomitante com a presença de correlação temporal, optou-se pelo emprego de um modelo Efeitos Mistos Lineares (*Linear Mixed-Effects Model*). A arquitetura foi ajustada a partir da utilização do método de Estimação Máxima de Verossimilhança Restrita (REML) e implementada com base na estrutura dos dados, que contemplam múltiplas observações agrupadas por unidade experimental.

Os efeitos aleatórios foram modelados considerando uma interceptação aleatória para cada unidade experimental, permitindo que cada grupo possuísse sua própria interceptação, o que reflete a variabilidade intrínseca entre os grupos. A avaliação da estrutura dos efeitos aleatórios deriva da estimativa dos desvios-padrão da interceptação aleatória e dos resíduos. Dada a natureza temporal dos dados, foi adotada uma estrutura de correlação autoregressiva de primeira ordem, ajustada para cada unidade experimental (~Tempo | Árvore).

Os efeitos fixos modelados consideraram a variável resposta Estoque de Carbono como função dos fatores Tratamento, Tempo e Bloco, bem como suas interações. O modelo completo incluiu os termos de interação de segundo e terceiro grau, permitindo a avaliação das relações não aditivas entre as variáveis preditoras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo inclui uma interação tripla entre Tratamento, Tempo e Bloco, o que significa que o efeito de Tratamento no estoque de carbono pode variar de acordo com o Tempo e o Bloco. Isso permitiu capturar possíveis mudanças nos efeitos do tratamento ao longo do tempo e em diferentes blocos.

O efeito do tratamento (p-valor de 0.4675) indica que, em média, o tratamento não tem um efeito direto significativo sobre o estoque de carbono das árvores até a idade avaliada. Em contrapartida, tanto o efeito da variável Tempo (p-valor de 0.0001), Bloco (p-valor de 0.0314) e Tempo:Bloco (p-valor de 0.0000) a presentaram níveis satisfatórios de significância, sugerindo que a quantidade de carbono sofre alterações d e acordo com os locais e ao longo do tempo. Essas e outras informações podem ser observadas com base n a Figura 1, na qual apresenta a influência dos diferentes tratamentos na evolução do estoque de carbono e m plantações de Pinus *taeda* L. ao longo dos anos.

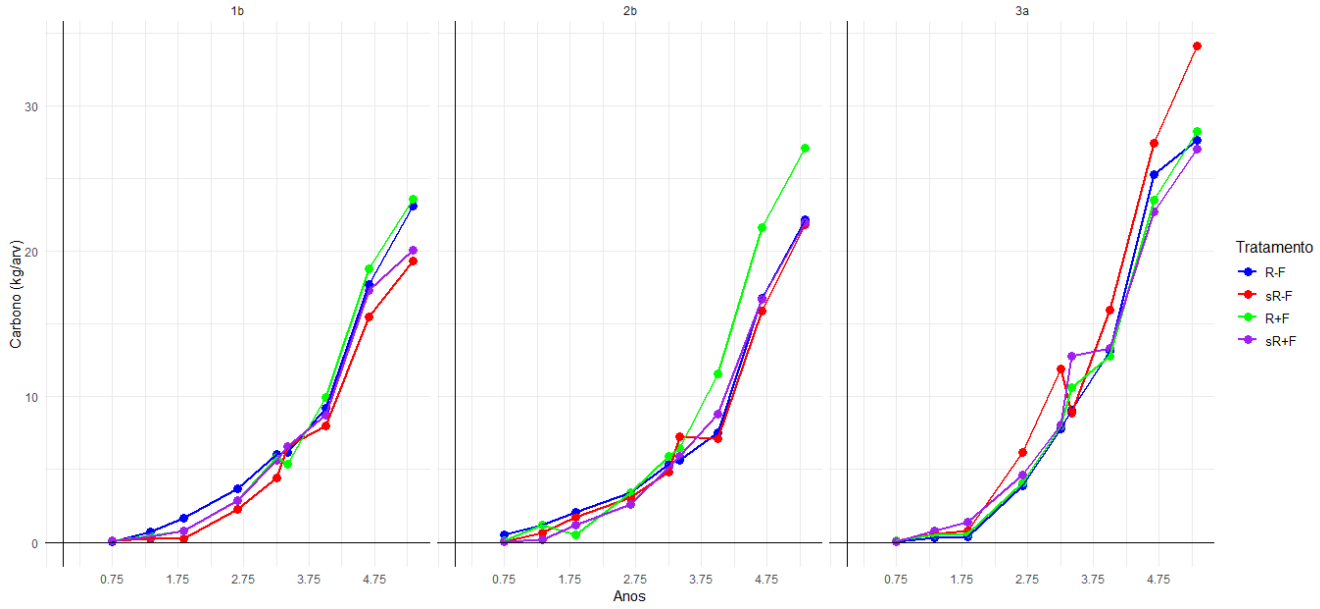

Figura 1. Comportamento médio do aumento do estoque de carbono médio por árvore ao longo dos anos para os diferentes tratamentos e blocos.

É perceptível que os estoques de C aumentaram em todos os blocos, conforme a análise temporal avança, ressaltando o crescimento acelerado a partir do terceiro ano. Essa característica é esperada nos povoamentos de Pinus, isto é, à medida que as árvores crescem e acumulam maior volume, biomassa e, consequentemente, estoque de carbono. Numericamente, aos 3 anos cada árvore contém aproximad amente 5 kg C, e chega a mais de 20 kg aos 5 anos (em média 8,31 t/ha e 35,69 t/ha respectivamente). Num povoamento uniforme, a taxa de acúmulo de carbono por hectare entre 3-5 anos é de aproximadamente 18,4 tC (Balbinot *et al*., 2003).

O tratamento R+F (Resíduo com Fertilizante) apresentou os maiores estoques de carbono nos blocos 1 e 2, indicando que a aplicação de fertilizante juntamente com o manejo de resíduos aumenta significativamente o acúmulo de carbono nas árvores. Por outro lado, o tratamento sR-F (sem Resíduo sem Fertilizante) tende a apresentar os menores estoques de carbono nos blocos 1 e 2, sugerindo que tanto a ausência de resíduos quanto a ausência de fertilizantes reduzem o crescimento das árvores e o acúmulo de carbono. Isso reforça a importância da fertilização para o aumento da produtividade e do acúmulo de carbono nas plantações de Pinus. Entretanto, esse comportamento não se observou no bloco 3, o que provavelmente indica a presença de algum fator local que contribuiu para o resultado, porém não ouve diferença significativa dos demais tratamentos.

O tratamento R-F (Resíduo sem Fertilizante) e sR+F (sem Resíduo com Fertilizante) apresentam comportamento intermediário, com flutuações entre os blocos, preconizando que o manejo dos resíduos ou a adição de fertilizantes isoladamente tem efeitos diferentes dependendo do local do bloco.

Embora a tendência geral de aumento de carbono ao longo dos anos seja consistente, há variação nos valores absolutos entre os blocos (1b, 2b, 3a), com o bloco 3 mostrando os maiores valores de carbono em quase todos os tratamentos. Isso pode indicar diferenças nas condições iniciais do solo, microclima, relevo (Watzlawick *et al*., 2013, Cubas *et al*., 2016), ou outros fatores ambientais que influenciam o crescimento das árvores e o acúmulo de carbono como a vegetação vizinha e questões antrópicas próximas a esse local, que, influenciaram o crescimento até a idade em estudo (Lima *et al*., 2022).

CONCLUSÕES

A pesquisa sugere que, em estágios iniciais de crescimento, as reservas de carbono são relativamente baixas, mas aumentam significativamente à medida que as árvores crescem. Tanto o manejo de resíduos quanto o uso de fertilizantes influenciam positivamente o acúmulo de carbono em plantações de Pinus *taeda* L no sul do Brasil. O tratamento que combina resíduo com fertilizante (R+F) resulta nos maiores estoques de carbono, o que indica ser a melhor estratégia para maximizar o sequestro de carbono ao longo dos anos. Para os estudos futuros é importante levar em consideração o relevo, vegetação e influência antrópica próximas a área de estudo e o microclima em cada bloco, buscando entender como esses fatores influenciam a variação observada no acúmulo de carbono entre os blocos. Além disso, é importante integrar cenários climáticos futuros para avaliar como diferentes práticas de manejo do resíduo da colheita e do solo responderão a alterações no regime de chuvas, temperaturas e outras variáveis climáticas. Isso pode ajudar a identificar estratégias de manejo mais resilientes em cenários de mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Embrapa através do projeto 10.23.04.002.00.00 e ao Consórcio internacional C-arouNd.

BIBLIOGRAFIA

CUBAS, Rafael; COSTA, Emanuel Arnoni; ZANIZ, Viviane. Carbon contents and modelling of total organic carbon for *Pinus taeda* L. from natural regeneration. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 40, n. 4, p. 661-668, 2016

BALBINOT, Rafaelo; SCHUMACHER, Mauro Valdir; WATZLAWICK, Luciano Farinha; SANQUETTA, Carlos Roberto. Inventário do carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, v. 5, n. 1, p. 1-12, jan./jun. 2003

DAYSTAR *et al*. Life-Cycle Assessment of Bioethanol from Pine Residues via Indirect Biomass Gasification to Mixed Alcohols. **Forest Products Journal**, v. 62, n. 4, p. 314-318, 2022.

HIGA RCV (2005) **Dinâmica de carbono de *Pinus taeda* L. voltadas a exigências climáticas e práticas silviculturais** [Relatório de pós-doutorado]. University of Florida, Gainesville

LIMA, R. *et al*. Fixação de carbono orgânico na biomassa de *Pinus taeda* L. em diferentes espaços vitais de crescimento. **Revista Instituto de Florestal**, v. 34, n. 2, p. 120-133, dez. 2022. DOI: 10.24278/2178-5031.202234202

NEUMANN, Klaus Werner; ZANATTA, Josiléia Acordi; RACHWAL, Marcos Fernando Glück. Manejo dos resíduos da colheita de pinus e os efeitos na emissão de gases de efeito estufa. **Anais do XXII Evento de Iniciação Científica da Embrapa Florestas**, Colombo, PR, 24 de agosto de 2023.

PENA-VERGARA, Gabriel; CASTRO, Luis Roberto; GASPARRETTO, Carlos Alberto; BIZZO, Waldir Antonio. Energy from planted forest and its residues characterization in Brazil. **Energy**, v. 239, Part C, p. 122243, 15 jan. 2022. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122243.

WATZLAWICK, Luciano Farinha; CALDEIRA, Marcos Vinicius Winckler; GODINHO, Tiago de Oliveira; BALBINOT, Rafaelo; TRAUTENMÜLLER, Jonathan William. Aboveground stock of biomass and organic carbon in stands of *Pinus taeda* L. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 3, p. 509-517, Sept. 2013.