



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**IMPACTOS NO SOLO DECORRENTES DA COLHEITA FLORESTAL
MECANIZADA NO BRASIL (2001-2021)**

Rildo Gabriel Rodrigues Farias

Brasília 30 de outubro de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UNB

FACULDADE DE TECNOLOGIA – FT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL – EFL

**IMPACTOS NO SOLO DECORRENTES DA COLHEITA FLORESTAL
MECANIZADA NO BRASIL (2001-2021)**

Aluno: Rildo Gabriel Rodrigues Farias

Matrícula: 13/0145131

Linha de Pesquisa: Ciência Florestais

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Sérgio Pereira

Trabalho apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, como parte das exigências para a obtenção do título de Engenheiro Florestal.

Brasília, 30 de outubro de 2021

Ficha catalográfica elaborada automaticamente, com
os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

FF224i Farias, Rildo Gabriel Rodrigues
Impactos no solo decorrentes da colheita florestal
mecanizada no Brasil (2001-2021) / Rildo Gabriel Rodrigues
Farias; orientador Reginaldo Sérgio Pereira. -- Brasília,
2021.
39 p.

Monografia (Graduação - Engenharia Florestal) --
Universidade de Brasília, 2021.

1. Colheita Floresta . 2. Densidade do solo. 3.
Resistência a penetração do solo. 4. Revisão sistemática. I.
Pereira, Reginaldo Sérgio, orient. II. Título.

AGRADECIMENTOS

À Universidade de Brasília por ter me proporcionado uma formação acadêmica sólida.

Aos meus professores por toda a contribuição em minha jornada acadêmica.

Aos servidores da Universidade de Brasília por todo o suporte que me foi proporcionado.

Ao Prof. Dr. Reginaldo Sérgio Pereira como ter me aceitado como orientado e pela condução dos trabalhos para a conclusão deste trabalho de conclusão de curso – TCC.

À doutoranda Sarah Neri e ao Dr. Jonas Inkotte pelas relevantes contribuições quando da participação da banca examinadora deste TCC.

Aos professores Eraldo Matricardi e Éder Miguel pela oportunidade de estágio que muito contribuiu para minha formação.

A *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH* e ao Serviço Florestal Brasileiro (SFB) pela vivência, pelo aprendizado e pela participação de forma decisiva na minha formação profissional.

Aos meus colegas de curso pelo agradável convívio durante todos estes anos.

Aos meus pais;

RESUMO

A colheita florestal no Brasil iniciou-se na década de 1900 com o plantio de eucalipto para produção de dormentes de madeira. Nos anos seguintes, observando o crescimento da produção e o retorno que este gerava, viu-se a necessidade de aumentar a produção a partir da mecanização da colheita. Contudo, o uso de máquinas na colheita florestal causa danos ao solo, como o aumento da densidade e aumento da resistência a penetração. Portanto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a compactação do solo em relação aos diferentes tipos de colheita florestal mecanizada de madeira no Brasil, nos últimos 20 anos, por meio de uma revisão sistemática, visando agrupar essas informações em um único documento que poderá ser utilizado pelos profissionais do setor florestal no planejamento das operações de colheita mecanizada em florestas nativas e plantadas. Os resultados obtidos mostram que, a depender do maquinário utilizado na colheita florestal, os impactos no solo ocorrem desde as camadas superficiais até as mais profundas. As principais variáveis que afetam a compactação do solo são a umidade, o maquinário utilizado na colheita florestal, o número de passadas do maquinário e as características do solo. Os dados mostram ainda que máquinas semelhantes podem infligir diferentes tipos de danos ao solo. Esse conjunto de dados e informações são importantes para a fase de planejamento da colheita florestal. A não adequação do sistema de colheita às características do sítio florestal implica na produtividade, nos custos de produção, no retorno financeiro, nos danos causados ao solo e nos ciclos de produção futuros.

Palavras-chave: Colheita florestal; densidade do solo, resistência a penetração do solo; revisão sistemática.

ABSTRACT

Forest harvesting in Brazil began in the 1900s with the planting of eucalyptus to produce wooden cross-ties. In the following years, observing the production growth and the return it generated, it was seen the need to increase production through the mechanization of harvesting. However, the use of machines in forest harvesting causes damage to the soil, such as increased density and increased resistance to penetration. Therefore, the objective of this work was to evaluate soil compaction in relation to different types of mechanized forest harvesting of wood in Brazil, in the last 20 years, through a systematic review, aiming to group this information in a single document that can be used by professionals from the forestry sector in the planning of mechanized harvesting operations in native and planted forests. The results obtained show that, depending on the machinery used in forest harvesting, impacts on the soil occur from the superficial to the deepest layers. The main variables that affect soil compaction are moisture, the machinery used in forest harvesting, the number of passes of the machinery and the characteristics of the soil. The data even show that similar machines can inflict different types of damage to the ground. This set of data and information is important for the planning phase of forest harvesting. Failure to adapt the harvesting system to the characteristics of the forest site implies productivity, production costs, financial return, damage to the soil and future production cycles.

Keywords: Forest harvest, soil bulk density, soil penetration resistance, systematic literature review.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cabeçote do tipo Harvester com sabre utilizado na colheita florestal mecanizada.	16
Figura 2. Equipamento do tipo Feller Buncher em atividade em uma área de cultivo florestal.	16
Figura 3. Equipamento do tipo Skidder utilizado para operações de arraste de madeira.....	17
Figura 4. Trator do tipo Forwarder utilizado em extração de toras de madeira..	17
Figura 5. Trator acoplado a carreta autocarregável.....	18
Figura 6. Fluxo de seleção dos artigos para a revisão	19
Figura 7. Número de publicações ao longo dos anos (2001 – 2021).	25
Figura 8. Tipos de floresta nas publicações.	26
Figura 9. Espécies abordadas nas publicações.	26
Figura 10. Equipamentos utilizados na colheita florestal.....	27
Figura 11. Densidade do solo resultante da atividade de máquinas em sistemas isolados na colheita florestal	28
Figura 12. Densidade do solo resultante da atividade de máquinas em sistemas compostos na colheita florestal.	28
Figura 13. Resistência a Penetração resultante da atividade de máquinas em sistemas isolados na colheita florestal.....	30
Figura 14. Resistência a Penetração resultante da atividade de máquinas em sistemas compostos na colheita florestal.	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA	9
2.2 APLICAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA NA ÁREA FLORESTAL	10
2.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO	10
2.4 O SETOR FLORESTAL BRASILEIRO	11
2.5 FLORESTAS PLANTADAS	12
2.6 COLHEITA FLORESTAL	13
2.7 Tipos de Solo.....	14
2.8 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA COLHEITA FLORESTAL...	15
3 METODOLOGIA UTILIZADA	18
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
4.1 INFORMAÇÕES DOS PERIÓDICOS AVALIADOS.....	20
4.2 FLORESTAS ALVO DE ESTUDOS	25
4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE COLHEITAS.....	27
4.4 DENSIDADE DO SOLO E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO.....	27
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

Os plantios florestais no Brasil datam de meados do ano de 1903, onde, a principal espécie utilizada para a produção de madeira era o eucalipto. Esta, era destinada ao uso de dormentes para estradas de ferro. Posteriormente, no ano de 1947, uma espécie que começou a ser utilizada, em conjunto ao eucalipto, foi o pinus, obtendo ótima adequação nas regiões em qual foi alocada, servindo de alternativa para o suprimento de madeira nacional, após, escassez de recursos provenientes da Mata Atlântica (SNIF, 2019).

Com o passar dos anos, viu-se que as espécies e o setor florestal tinham futuro, começou-se, então, a investir em pesquisa para melhoramento e desenvolvimento de tecnologias para a silvicultura do eucalipto, este, vindo a produzir cerca de 60m³/ha em rotações de colheita florestal (SNIF, 2019). A utilização de florestas plantadas, mesmo sendo criticadas por conta de seu sistema de monocultura, acabam por serem benéficas a vegetação nativa, amortizando a sua exploração, servindo de proteção para o solo e água e também, servindo para reaproveitamento de áreas degradadas (SNIF, 2019).

Mas, mesmo que haja pontos positivos atraentes, o desenvolvimento e planejamento de um ciclo florestal demanda organização e cuidado. Para Ferraz et al. (2019), o ciclo florestal pode vir a gerar impactos negativos, necessitando haver manutenção entre etapas de implantação e colheita. Um desses pontos negativos é a compactação e aumento da densidade da “ferramenta mais importante” no processo de desenvolvimento florestal: o solo.

O melhoramento do maquinário florestal e, conseqüentemente, o seu aumento de peso, fazem com que a compactação do solo em sítios florestais seja cada vez mais recorrente, gerando baixa produtividade e, assim, prejuízo ao empreendimento (SILVA et al., 2007). Essa compactação está atrelada a soma do peso do maquinário com o número de passadas em uma mesma linha, levando-se em consideração o peso da carga de madeira e características do solo, como a umidade e composição mineralógica (SILVA et al., 2007).

Segundo Pincelli et al. (2014), dependendo das máquinas utilizadas na colheita, grande parte do sítio florestal pode vir a ser afetado se ao menos uma única vez o maquinário passar por um determinado local. Assim, quando possível, uma maneira de se evitar a compactação em todo o sítio é a restrição ao tráfego de veículos por toda a área, havendo necessidade de se designar certos caminhos onde ficarão concentrados as máquinas de extração e arraste (Seixas e Souza, 2007).

Apesar de ser uma tarefa de difícil execução, deve-se envidar todos os esforços a fim de se evitar a compactação e, por tal, manter a boa capacidade de produção do solo. Isso pode ser obtido por meio de estudos prévios da área durante a fase de planejamento da colheita. Esses estudos compreendem, não somente, o levantamento aéreo da área da colheita, a escolha do maquinário que será utilizado na colheita e a criação das estradas para o tráfego desse maquinário.

Isso posto, o objetivo geral deste trabalho será avaliar a compactação do solo em relação a cada tipo de colheita florestal mecanizada de madeira no Brasil, nos últimos 20 anos, por meio de uma revisão sistemática, visando agrupar essas informações em um único documento que poderá ser utilizado pelos profissionais do setor florestal no planejamento das operações de colheita mecanizada em florestas nativas e plantadas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção ocupará-se de apresentar os conceitos e a compreensão dos diversos assuntos que são abordados quando se trata de colheita florestal, sob a visão de especialistas na área, de forma sucinta, mas sem deixar de ser abrangente, a fim de alcançar a compreensão do leitor e a consecução deste trabalho.

2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA

Para Galvão e Pereira (2014), revisão sistemática trata-se de uma forma de estudo que tenta esclarecer indagações a respeito de determinado tema, utilizando-se de pesquisas com o foco em uma questão definida previamente, a fim de se identificar, selecionar, avaliar e sintetizar os resultados mais importantes. Tal estudo depende da fonte primária, visto que, integram informações advindas de estudos passados, experimentais de determinado tema (SAMPAIO; MANCINI, 2007).

Uma revisão sistemática, para ser bem sucedida, precisa seguir etapas, quais sejam: o objetivo da revisão, a escolha da base de pesquisa e quais resultados serão provenientes daquele trabalho (SAMPAIO; MANCINI, 2007). Nesse sentido, Galvão e Pereira (2014) enumeram o método de uma revisão sistemática:

“[...] (1) elaboração da pergunta de pesquisa; (2) busca na literatura; (3) seleção dos artigos; (4) extração dos dados; (5) avaliação da qualidade metodológica; (6) síntese dos dados (metanálise); (7) avaliação da qualidade das evidências; e (8) redação e publicação dos resultados.” (GALVÃO; PEREIRA, p. 183, 2014).

Já para Sampaio e Mancini (2007) há relatos de inconsistências terminológicas, visto que algumas revisões sistemáticas não incluem sínteses estatísticas em seus resultados, enquanto que uma outra parte de revisões sistemáticas acaba por fazê-la. Apontamentos pertinentes a respeito de revisões sistemáticas referem-se ao uso da metanálise, a qual consiste na síntese de resultados independentes para que seja gerado um índice único e que este demonstre uma determinada intervenção, esta que ao ser alimentada com outras amostras de estudos acaba por promover melhor poder estatístico de análise (SAMPAIO; MANCINI, 2007).

2.2 APLICAÇÃO DA REVISÃO SISTEMÁTICA NA ÁREA FLORESTAL

A propagação de revisões sistemáticas ajuda a mensurar a qualidade de conhecimento de um determinado tema. Dito isso, a revisão sistemática para uma área tão diversificada quanto a área florestal faz-se necessária devido à quantidade de informações que se possui sobre seus temas de estudo (MLENEK et al., 2019).

Entretanto, o que se observa é que a revisão sistemática é mais propagada em outras áreas de pesquisa, principalmente as áreas da saúde. Isso pode estar associado à falta de conhecimento dos profissionais da área florestal desse tipo de pesquisa tão útil que proporciona respostas específicas sobre um determinado tema, permitindo-se que haja aplicação na prática dos resultados das revisões obtidas (GALVÃO et al., 2004).

Vê-se então o potencial perdido na área florestal, já que há escassez de material para consultas provenientes de revisões sistemáticas. Há que se observar ainda que a totalidade das pesquisas por meio de revisões sistemáticas na área florestal datam do período de 2016 a 2021 e possuem diferentes métodos de pesquisa e variações nos tratamentos de dados. Se por um lado há essa lacuna temporal de publicações e variedades metodológicas, por outro há uma grande oportunidade para os profissionais da área que se interessem por enveredar por esse tipo de pesquisa.

2.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO

O aumento da carga de máquinas agrícolas e florestais é um fator que gera preocupação a produtividade do solo àqueles que trabalham nesse ramo. Isso dá-se, principalmente, por conta da compactação do solo que o tráfego de máquinas desse porte ocasiona ao solo após os ciclos de produção (SILVA et al., 2007). Essa compactação acaba por alterar diversas propriedades do solo, principalmente as propriedades físicas e biológicas (RODRIGUES; LOPES, 2018).

Para Rodrigues e Lopes (2018), a compactação é uma força mecânica atuante no solo e que, por sua vez, pode ter como resultado a diminuição do índice de porosidade do solo, além

de fazer com que haja um aumento da densidade deste, o que, por sua vez, acarreta problemas de penetração da água e desenvolvimento de raízes. Esses problemas ocasionam a redução de produtividade dos solos e com significativos impactos na cadeia de produtos florestais.

Um dos fatores que tem maior influência na compactação do solo é a umidade, pois é ela que determina o grau de deformidade que o solo sofrerá. Sendo assim, caso o teor de umidade de um solo esteja elevado, a resistência desse solo à compactação estará comprometida, fazendo com que este ceda mais facilmente (PAULUCIO et al., 2014).

Outro fator importante a ser destacado é a área de contato do pneu das máquinas com o solo, onde, de acordo com Fernandes et al., 2008, conforme o peso dessas máquinas aumenta, seja por conta da carga de madeira ou por conta de versões mais novas dos veículos, o solo acaba por sofrer um aumento da carga por onde a máquina trafega. Sendo assim, faz-se necessário o uso de alternativas a fim de se diminuir a pressão sobre o rodado, onde a utilização de pneus duplos passa a ser mais viável do que máquinas com pneus simples, mesmo que haja uma diminuição da compactação em sentido vertical e aumento da pressão de superfície (FERNANDES et al., 2008).

Segundo Lopes et al. (2011), as cinco primeiras passadas de tráfegos são as que contribuem para o maior índice das compactações, cerca de 80%, entretanto, outros estudos divergem desse número. Encontrou-se que os níveis de compactação ocorreram da primeira à nona vez que o veículo passou pelo local. As passadas das máquinas em cima de resíduos da produção florestal acabam por impactar menos o solo do que as partes que não estão cobertas (LOPES et al., 2011).

2. 4 O SETOR FLORESTAL BRASILEIRO

O Brasil é um país que é bastante conhecido por suas florestas, sendo elas nativas ou plantadas. Essa fama, por sua vez, não é à toa, visto que cerca de 58,5% do território nacional é composto de florestas, sejam elas nativas ou plantadas (SFB, 2020). Frente a essa riqueza ambiental e potencial econômico, maneiras de usufruir do seu potencial financeiro surgiram, como os manejos florestais sustentáveis, como as concessões florestais de florestas públicas e unidades de conservação, que permitem o uso desses recursos florestais.

Historicamente, por mais que as práticas de concessão levassem em consideração a preservação do ambiente florestal, elas, por sua vez, acabavam por não suprir determinadas demandas de mercado e ou a exploração florestal acabava por gerar mais prejuízos ao ambiente de que lucro para empresas que optavam por adotar esses sistemas. Sendo assim, viu-se a

oportunidade de as empresas começarem a atuar com o mercado de florestas plantadas, este representando cerca de 2% das florestas do país (SFB, 2020)

Foi esse cenário que desencadeou o desenvolvimento de práticas de produção de árvores plantadas no Brasil. Esse setor cresce ano após ano, chegando a contribuir com cerca de 1,2% do PIB brasileiro e mostrando que o setor ganha força com o passar do tempo, arrecadando valores de receita na casa de R\$ 90 bilhões. Cabe destacar, inclusive, que esse desenvolvimento está aliado às boas práticas de desenvolvimento com uso de tecnologias de baixo carbono e melhoras práticas de manejo florestal (IBA, 2020).

O setor acaba por produzir diversos tipos de produtos e subprodutos, onde pode-se destacar madeira serrada, papel, celulose e carvão vegetal. Todos esses produtos advêm de aproximadamente 9 milhões de hectares de florestas plantadas, que acabam por reduzir parte da exploração de florestas nativas. Destaca-se também que o setor conta ainda com áreas de Reserva Legal (RL), RPPN (Reserva Particular do Patrimônio Natural) e Áreas de Preservação Permanente (APP), o que contribui ainda mais para a preservação das áreas nativas (IBA, 2020).

2.5 FLORESTAS PLANTADAS

A quantidade de hectares de florestas plantadas no Brasil é crescente. Entre os anos de 2018 e 2019 houve um aumento de 2,4%, sendo a maioria dos hectares de espécies de eucalipto e pinus. Além dessas espécies, há também uso de espécies não tão convencionais, mas, que também possuem um ótimo valor agregado, como a seringueira, acácia, teca e paricá (IBA, 2020).

As florestas plantadas estão presentes em todo o país, entretanto, grande parte delas estão localizadas nas regiões sul e sudeste. Na região sul, concentram-se as maiores quantidades de plantações de pinus do Brasil, cerca de 87% de todas as plantações, no estado do Paraná. Já Mato Grosso, Rio Grande Sul/Roraima e Mato Grosso do Sul destacam-se pela produção de teca, acácia e seringueira, respectivamente (IBA, 2020).

O motivo por grande parte dos plantios serem de eucalipto e pinus está intrinsicamente ligada a essas duas espécies florestais possuírem uma produção de m^3/ha muito elevada (IBA, 2020). A produção de m^3/ha para eucalipto gira em torno de 35,3 a 36 e a de pinus 30,1 a 31,3, mostrando que essas espécies são mais rentáveis que outras espécies utilizando-se a mesma quantidade de espaço e um período mais curto entre uma rotação e outra (IBA, 2020). As variações apresentadas nas produções anuais são consequência de fatores bióticos e abióticos,

além de processos de melhoramento genético e mecanização de áreas que possuíam, há pouco tempo, sistemas semimecanizados (IBA, 2020).

2.6 COLHEITA FLORESTAL

2.6.1 Histórico

Para Barbosa et al. (2014), a colheita florestal consiste nas atividades de preparação ao transporte da madeira, utilizando-se de modelos e procedimentos característicos para que esta possa vir a ser utilizada como produto final.

Os métodos de colheita podem ser caracterizados em manual, semimecanizado e mecanizado. O método manual é composto por corte com machado e utilização de traçador; atualmente é utilizado em regiões de difícil acesso cujas máquinas de grande porte acabam por não conseguir trafegar (DAVID; FIEDLER; BAUM, 2014).

O método semimecanizado faz uso de motosserra, instrumento este que facilitou o corte, mas ainda assim fazia uso de grande esforço por parte dos operadores. Tal sistema perdurou até a década de 1940, a partir de quando os trabalhos de colheita florestal passaram a ser um misto de sistemas manuais e semimecanizados. Segundo David, Fiedler e Baum (2014), a partir da década de 1970 os métodos de colheita totalmente mecanizados começaram a ganhar força, principalmente influenciado pelo mercado internacional. Esses métodos mecanizados foram responsáveis pelo crescimento exponencial da produção de madeira (DAVID; FIEDLER; BAUM, 2014).

2.6.2 Atividades dos Sistemas de Colheita

Os sistemas de colheita de madeira são divididos em sistema de toras curtas, toras longas e árvores inteiras, a depender do tamanho do produto final. No sistema de toras curtas, todas as operações de processamento de madeira são realizadas no campo, enquanto que nos sistemas de toras longas e árvores inteiras, parte do processamento é realizado no campo e parte em pátios de processamento.

2.6.2.1 Corte

Constituem toda e qualquer atividade relativa ao preparo da madeira, como as operações de derrubada, desgalhamento e traçamento, assim como o descascamento, a depender do sistema de colheita aplicado (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 2003).

2.6.2.2 Desgalhamento e Traçamento

O desgalhamento, na grande maioria das vezes, está atrelado ao traçamento, sendo os desgalhamentos e traçamentos mais comuns: manual com machado e motosserra, grade desgalhadora com motosserra, cabeçote de Harvester, desgalhador e traçador mecânico (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 2003).

2.6.2.3 Extração

A extração pode ser feita de diferentes maneiras, como arraste, baldeação ou por suspensão. Se a madeira tiver contato com o solo, denomina-se a arraste; quando realizada de maneira suspensa é denominada de baldeio. Há também opções de extração por teleféricos e helicópteros (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 2003).

Outra maneira de se fazer a extração é através da extração direta, situação na qual se faz uso de caminhões de transporte que adentram nos talhões e, conseqüentemente, reduzem parte do manuseio da madeira. Entretanto, tal prática pode ser prejudicial ao terreno porque pode causar compactações no talhão, o que tem efeito sobre a produção do solo em rotações posteriores (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 2003).

2.6.2.4 Carregamento

O carregamento é o processo no qual a madeira extraída do talhão é carregada no caminhão de transporte. Tal processo é realizado de diferentes formas, sendo elas: de maneira manual, com guas hidráulicas, com carregadores frontais e escavadeiras com garras (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 2003).

2.6.2.5 Descascamento

O descascamento consiste da retirada da casca do fuste da árvore, o que pode ser realizado nas áreas de corte, em pátios ou na beira das estradas (MALINOVSKI; MALINOVSKI, 2003).

2.7 Tipos de Solo

Os solos são classificados a partir dos seus componentes morfológicos, físicos, químicos e composição mineral. Além disso, fatores como clima, vegetação, relevo, material originário, condições hídricas, também alteram a característica do solo (SANTOS et al., 2018). Os solos abordados neste trabalho, de acordo com a classificação estabelecida pela Embrapa (SANTOS et al., 2018), são:

- a) Argissolo: solo possuindo desenvolvimento avançado, mas, não possuindo ferralitização completa e mobilização de argila entre camadas.
- b) Cambissolo: Solo possuindo pouco desenvolvimento em sua estrutura, além de quase não possuir estrutura de rocas ou de estratificação de sedimentos.
- c) Espodossolo: Solo possuindo podzolização e eluviação de materiais, cujo componente principal é o alumínio e matéria orgânica.
- d) Latossolo: Assim como o argissolo, o latossolo possui desenvolvimento avançado, ressaltando-se o processo de ferralitização e intemperização intensa de minérios primários. Possui concentração de minerais de argila, assim como podendo possuir, também, teores elevados de óxidos de ferro e de alumínio;
- e) Neossolo: Solos em formação;
- f) Nitossolo: Solos bem desenvolvidos e com ferralitização intensa, podendo haver alta concentração de óxidos de cálcio e minerais que compõem a argila;
- g) Plintossolo: Solo com potencial de consolidação exacerbada e possuindo segregação elevada de ferro, que acaba por servir de agente cimentante.

Solos com maiores níveis de matéria orgânica, textura e granulometria são mais susceptíveis ao processo de compactação. Estão nessa classe os solos argilosos, como o argissolo e o latossolo. A umidade presente no solo é outro fator importante quando da avaliação de susceptibilidade do solo à compactação.

2.8 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA COLHEITA FLORESTAL

O sistema florestal escolhido e as características do sítio florestal determinarão quais máquinas e equipamentos serão utilizados na colheita florestal. O uso dessas máquinas proporcionou produção mais elevada e redução de custos, mas, também proporcionou aumento de impactos nas áreas de produção florestal. As máquinas utilizadas para colheita florestal, de acordo com a classificação estabelecida por Rodrigues (2018), são:

2.8.1 Harvester

Tipo de trator utilizado para derrubar, desgalhar, traçar e empilhar toras de madeira. Esta máquina pode utilizar diferentes tipos de rodados, podendo ser de esteiras ou pneus, a depender da região em que está sendo utilizado (Figura 1).

Figura 1. Cabeçote do tipo Harvester com sabre utilizado na colheita florestal mecanizada.



Fonte: o próprio autor (2018).

2.8.2 Feller Buncher

É uma máquina que realiza funções de derrubada e empilhadeira e que assim como o Harvester, pode utilizar diferentes tipos de rodados a depender da situação. Feller Buncher é a determinação do cabeçote que consegue acumular fustes de árvore durante o corte, enquanto que o cabeçote que não consegue realizar esta operação é chamado de Feller (Figura 2).

Figura 2. Equipamento do tipo Feller Buncher em atividade em uma área de cultivo florestal.



Fonte: o próprio autor (2018).

2.8.3 Skidder

Máquina de extração de madeira por arraste que pode ser utilizada em terrenos com até 40% de inclinação (Figura 3).

Figura 3. Equipamento do tipo Skidder utilizado para operações de arraste de madeira.



Fonte: o próprio autor (2018).

2.8.4 Forwarder

Trator utilizado no baldeio de toras e possuindo boa produtividade em terrenos com inclinação de até 30%. A capacidade de carga de madeira transportada varia de 8 a 20 toneladas (Figura 4).

Figura 4. Trator do tipo Forwarder utilizado em extração de toras de madeira..



Fonte: o próprio autor (2018).

2.8.5 Trator

Trator comum que pode ser utilizado em diferentes etapas do processamento da madeira como a extração e o corte, caso, faça-se uso de equipamentos como cabeçotes Harvester e carreta autocarregável (Figura 5).

Figura 5. Trator acoplado a carreta autocarregável.



Fonte: Connect Americas (2017).

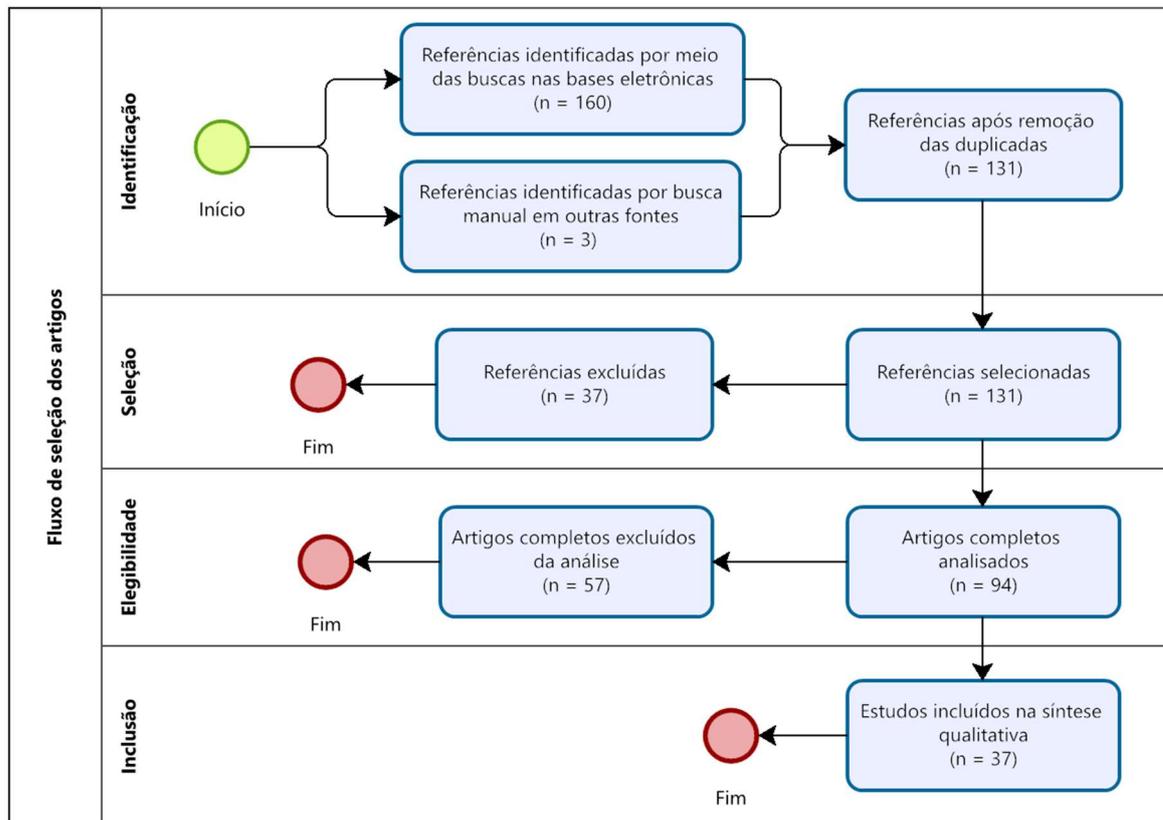
3 METODOLOGIA UTILIZADA

A revisão sistemática teve como base a metodologia utilizada por Inkotte et al., (2019). A base de dados para o presente trabalho utilizou-se, apenas, de artigos publicados em periódicos relativos a estudos nacionais. O período de levantamento das informações ocorreu entre os meses de agosto e setembro de 2021. A figura 6 mostra o fluxo de seleção dos artigos. Para a elaboração do fluxo de seleção dos artigos foi utilizada a versão *freeware do software* BizAgi BPM®, versão 3.9.0.015, este de propriedade da companhia BizAgi®.

Iniciou-se selecionando as bases de dados do Scielo e Periódico Capes, entretanto, visando melhorar a coleta de informações, decidiu-se incluir a plataforma Google Acadêmico. Sendo assim, prosseguiu-se com as pesquisas utilizando as palavras-chave: (a) colheita florestal e (b) compactação do solo, entre o intervalo de anos 2001 a 2021, utilizando-se do conector “AND” entre as expressões para a realização da busca. Encontrou-se 18 artigos na base Scielo, 96 artigos no Periódico Capes e cerca de 12.000 ocorrências na base Google Acadêmico, optando-se por escolher a consulta das primeiras 20 primeiras páginas nesta base.

Após avaliação dos títulos relacionados à compactação do solo, etapa de identificação, obteve-se um total de 20 artigos na plataforma Periódicos Capes, 7 artigos na plataforma Scielo e 133 artigos na plataforma Google Acadêmico, resultando em 160 artigos. Ainda na fase de identificação foram retiradas as publicações veiculadas em outros meios que não revistas ou jornais científicos, como simpósios, monografias e livros, bem como as publicações repetidas, restando-se 131 artigos que seguiram para a fase de seleção.

Figura 6. Fluxo de seleção dos artigos para a revisão



Fonte: BRASIL. Diretrizes metodológicas: elaboração de revisão sistemática e metanálise de ensaios clínicos randomizados. In: Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência TeIEdDce, Tecnologia., editors. Brasília, DF.2012.

A fase de seleção excluiu 37 artigos porque não se enquadravam no tema objeto desta revisão sistemática quando da leitura do resumo ou *abstract* de cada uma das publicações. Assim, seguiram-se 94 publicações para a fase de elegibilidade, quando foram excluídas 57 publicações após a completa leitura dos artigos, restando, dessa forma, 37 artigos que foram incluídos na revisão sistemática.

Uma vez realizada a triagem dos artigos, registrou-se as informações em tópicos para análise:

- Periódico – nome, local de origem e ano de publicação;
- Estudo – ano de realização, região, coordenadas geográficas, tipo de floresta, relevo, tipo de solo, clima, estação do ano;
- Colheita – etapa operacional, máquinas e equipamentos empregados;
- Variáveis de interesse – densidade e resistência à penetração.

Os dados apresentados na seção Resultados e Discussão são originados da catalogação dos resultados dos estudos constantes dos artigos incluídos nesta revisão sistemática e incluídos em uma base de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 INFORMAÇÕES DOS PERIÓDICOS AVALIADOS

Os 37 artigos selecionados na etapa de inclusão encontram-se na Tabela 1. Foram identificadas 16 revistas científicas onde foram publicados esses artigos, cuja revista de maior expressão foi a Revista *Árvore*, com 11 publicações, correspondendo a 29,72% do total de publicações. Os demais periódicos contabilizaram até 3 publicações por revista.

A identificação dessas revistas é um bom direcionador para pesquisadores da área florestal, razão pela qual indica-se ainda o fator Qualis Capes de cada uma dessas revistas.

Tabela 1. Relação de periódicos publicados no período de 2001 a 2021 e incluídos na revisão sistemática com a sua qualificação Qualis CAPES e Index-H, número de publicações, referências e locais de publicação por cidade e estado.

(continua)				
Nome da Revista	Classificação da Revista	Número de Publicações	Referência	Local de Publicação
Pesquisa Florestal Brasileira	B4	1	Gava (2003)	Colombo (PR)
Brazilian Journal of Animal and Environmental Research	H4/H5	1	Ferraz et al. (2019)	Curitiba (PR)

Tabela 1. Relação de periódicos publicados no período de 2001 a 2021 e incluídos na revisão sistemática com a sua qualificação Qualis CAPES e Index-H, número de publicações, referências e locais de publicação por cidade e estado.

(continuação)

Nome da Revista	Classificação da Revista	Número de Publicações	Referência	Local de Publicação
Ciência e Agrotecnologia	B1	2	Andrade et al. (2017); Martins et al. (2018)	Lavras (MG)
Embrapa Florestas	B5	3	Silva; Junior e Leite (2007); Junior et al. (2007); Andrade et al. (2011)	Colombo (PR) / Brasília (DF)
Revista Agroecossistemas	B5	1	Carvalho; Carvalho e Gama (2019)	Belém (PA)
Revista Árvore	A2	11	Fernandes e Souza (2003); Junior et al. (2003); Dedecek e Gava (2005); Lopes et al. (2006); Seixas e Souza (2007); Lima et al. (2008); Milde; Dedecek e Gava (2010); Lopes et al. (2011); Silva; Junior e Leite (2011); Szymezak et al. (2014); Payá et al. (2019)	Viçosa (MG)
Revista Biodiversidade	B5	1	Paulucio et al. (2014)	Cuiabá (MT)
Revista Brasileira de Ciência do Solo	B1	3	Mello-Ivo e Sheila Ross (2006); Silva et al. (2007); Junior et al. (2008);	Ribeirão Preto (SP) / Viçosa (MG)
Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental	A2	1	Couto et al. (2013)	Campina Grande (PB)
Revista Ceres	B1	2	Fernandes (2008); Rodrigues e Lopes (2018);	Viçosa (MG)

(conclusão)				
Nome da Revista	Classificação da Revista	Número de Publicações	Referência	Local de Publicação
Revista Cerne	A2	3	Junior et al. (2002); Martins et al. (2013); Pincelli; Seixas e Nunes (2014)	Lavras (MG)
Revista Ciência Florestal	A2	1	Sampietro; Lopes e Reichert (2015)	Santa Maria (RS)
Revista Floresta	A2	2	Lopes et al. (2011); Sampietro e Lopes (2016)	Curitiba (PR)
Revista Floresta e Ambiente	B1	2	Lopes et al. (2015); Rodrigues et al. (2018)	Rio de Janeiro (RJ)
Revista Scientia Florestalis	B1	3	Seixas e Júnior (2001); Mendes e Seixas (2018); Leite et al. (2020).	Piracicaba (SP)

Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

A Tabela 2 demonstra informações importantes que interferem na compactação e densidade do solo. Os dados revelam que há uma certa concentração de trabalhos nos Estados de São Paulo e Minas Gerais, ambos com 9 publicações cada, que juntos correspondem a cerca de 50% dos artigos incluídos na revisão. Tal concentração de trabalhos nessas regiões, advém, principalmente, da grande concentração de empresas de papel e celulose ali instaladas.

Há que se destacar que 78% dos trabalhos não indicaram a declividade do terreno e o período do ano no qual o estudo foi realizado. Outra ausência observada é a classificação do clima do local. Esses dados são importantes porque a ausência limita análises e comparações entre os diversos estudos.

O Ângulo de declividade dos terrenos é importante para se analisar, por exemplo, a capacidade do solo de reter umidade, o escoamento de águas pluviais, o sistema de colheita a ser empregado e as máquinas que serão utilizadas na colheita florestal.

O período do ano e a classificação do clima no qual a colheita foi realizada limita a análise de se identificar se o solo está mais ou menos susceptível à compactação no momento em que a colheita foi realizada, o que é influenciado pela umidade do solo.

Tabela 2. Ano de publicação dos artigos incluídos na revisão sistemática por região do estudo, ângulo de declividade do solo, classificação do clima, sazonalidade climática e tipo do solo.

(continua)

Ano de Publicação	Região do Estudo	Ângulo	Classificação	Sazonalidade	Tipo de solo
Gava (2003)	Itatinga/SP; São Miguel Arcanjo/SP	N/I	Cfa	N/I	Textura Arenosa/Média/Argilosa
Ferraz et al. (2019)	São Pedro/SP	N/I	Cfa	N/I	Argissolo
Martins et al. (2018)	Capão Bonito/SP; Três Lagoas/MS	N/I	Cfb/Aw	N/I	Latossolo e Argissolo
Silva; Junior e Leite (2007)	Belo Oriente/MG, São João Evangelista/MG	N/I	N/I	N/I	Latossolo
Junior et al. (2007)	Espírito Santo/ES ¹	N/I	N/I	N/I	Argissolo, Plintossolo, Latossolo
Andrade et al. (2011)	São Paulo/SP	N/I	Cwa	N/I	Neossolo
Carvalho; Carvalho e Gama (2019)	Belterra/PA	N/I	N/I	N/I	N/I
Fernandes e Souza (2003)	Guanhães/MG	20%	N/I	N/I	Latossolo
Junior et al. (2003)	Peçanha/MG	N/I	N/I	N/I	Latossolo
Dedecek e Gava (2005)	São Miguel Arcanjo/SP, Itatinga/SP	N/I	N/I	N/I	Latossolo, Neossolo
Lopes et al. (2006)	Belo Oriente/MG	12-35%	N/I	N/I	Latossolo
Seixas e Souza (2007)	Itatinga/SP	N/I	N/I	N/I	Argila, Silte, Areia Grossa, Areia Média e Areia Fina
Lima et al. (2008)	Itamarandiba/MG	N/I	N/I	N/I	Latossolo
Milde; Dedecek e Gava (2010)	São Miguel do Arcanjo/SP; Itatinga/SP	N/I	Cfa	N/I	Neossolo; Latossolo e Argissolo
Lopes et al. (2011)	Santa Catarina/SC ²	N/I	Cfb	Chuva e seca	Cambissolo
Silva; Junior e Leite (2011)	Santa Maria de Itabira/MG	N/I	N/I	N/I	Latossolo

Tabela 2. Ano de publicação dos artigos incluídos na revisão sistemática por região do estudo, ângulo de declividade do solo, classificação do clima, sazonalidade climática e tipo do solo.

(conclusão)					
Ano de Publicação	Região do Estudo	Ângulo	Classificação	Sazonalidade	Tipo de solo
Szymezak et al. (2014)	Paraná/PR ³	N/I	Cfa	Período Chuvoso	Latossolo
Payá et al. (2019)	Paraná/PR ⁴	N/I	Cfb	N/I	Nitossolo
Paulucio et al. (2014)	Brasília/DF	N/I	Aw	N/I	Latossolo
Mello-Ivo e Sheila Ross (2006)	Manaus/AM	N/I	N/I	Chuva	Latossolo
Silva et al. (2007)	Paraíso/MG	30%	N/I	N/I	Latossolo
Junior et al. (2008)	Eunápolis/BA	N/I	N/I	N/I	Argissolo
Couto et al. (2013)	Anápolis/GO	N/I	N/I	N/I	Latossolo
Fernandes (2008)	Belo Oriente/MG	25%-34%	Aw	N/I	Latossolo
Rodrigues e Lopes (2018)	Região dos Campos Gerais/PR ⁵	6%	Cfa	N/I	Latossolo
Junior et al. (2002)	Litoral Norte/BA	N/I	N/I	N/I	Argissolo
Martins et al. (2013)	Curvelo/MG	N/I	N/I	N/I	Latossolo
Pincelli; Seixas e Nunes (2014)	Mogi Guaçu/SP	N/I	Cwa	Período Chuvoso	Argissolo
Andrade et al. (2017)	Teixeira de Freitas/BA	N/I	N/I	N/I	Argissolo e Espodossolo
Sampietro; Lopes e Reichert (2015)	Norte de Santa Catarina/SC ⁶	N/I	Cfb	N/I	Neossolo
Lopes et al. (2011)	Mandirituba/PR	8%	Cfb	N/I	Latossolo
Sampietro e Lopes (2016)	Santa Catarina/SC ⁷	N/I	Cfb	N/I	Cambissolo
Lopes et al. (2015)	Campo do Tenente/PR	N/I	Cfb	N/I	Cambissolo
Rodrigues et al. (2018)	Telêmaco Borba/PR	N/I	Cfa/Cfb	N/I	Latossolo
Seixas e Júnior (2001)	Luiz Antônio/SP; Jacareí/SP	15%-25%	Cwa	Período Chuvoso	Latossolo
Mendes e Seixas (2018)	Itatinga/SP	2%-10%	N/I	N/I	Latossolo
Leite et al. (2020)	Eunápolis/BA	N/I	Af	N/I	Latossolo

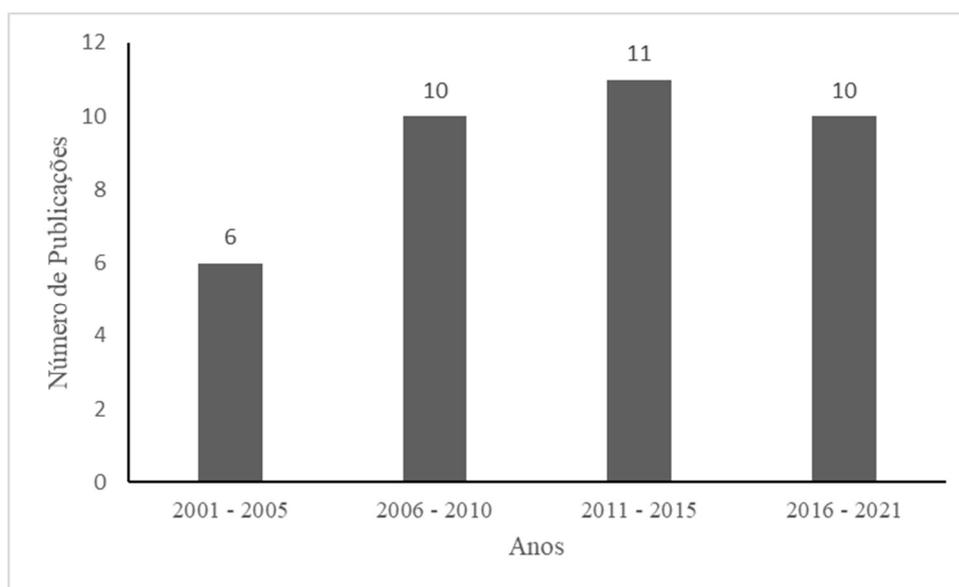
Onde: ¹Coordenada de estudo: 40°14'W, 19°51'S; ²coordenada de estudo: 49° 29' 00'' W, 26° 42' 52'' S; ³coordenada de estudo: 52°51'55'' W, 25°27'22''S;⁴ coordenada de estudo: 51°45'41''W, 25°10'26''S; ⁵coordenada de estudo: 50° 36' 58" W, 24° 19' 26" S;⁶coordenada do estudo: 49°29'00' W, 26°42'52'' S; ⁷coordenada de estudo: longitude de 49°29'00' W, 26°42'52'' S.

Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

A figura 7 apresenta a análise temporal das publicações. É possível observar que há um aumento expressivo no número de publicações ao longo do período analisado, mesmo que nos últimos seis anos o número de publicações tenha retornado ao valor que era há dez anos. Apesar dessa aparente retração, o número de publicações manteve-se praticamente estável em cada um dos períodos analisados. Dentre os anos de estudo, pode-se destacar os anos de 2007, 2011 e 2018 com quatro publicações cada ano.

Sendo o Brasil destaque na área de colheita florestal, é observado que o número de trabalhos publicados que tratam de compactação proveniente de colheita mecanizada é pequeno se comparado à importância do setor e do tema para a cadeia produtiva.

Figura 7. Número de publicações ao longo dos anos (2001 – 2021).



Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

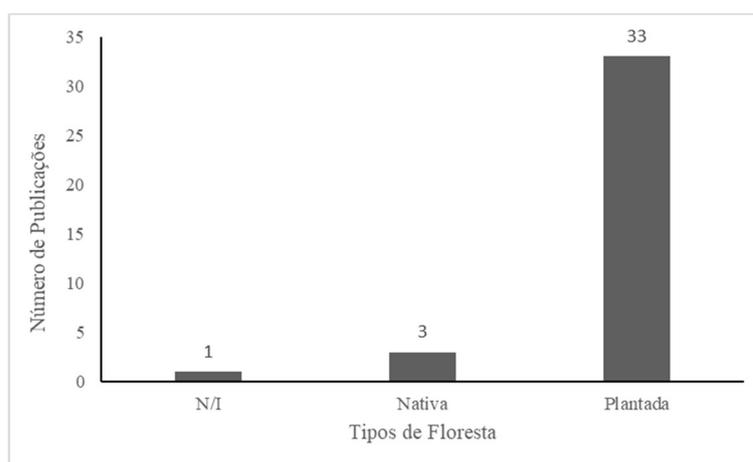
4.2 FLORESTAS ALVO DE ESTUDOS

As florestas plantadas foram o alvo de 89% das publicações incluídas na revisão, o que demonstra um grande interesse e, de certa forma, preocupação com a produtividade dessas áreas (Figura 8). Isso tem um grau de importância relevante para a estratégia do país de aumento de produção de florestas plantadas e a consequente preservação de áreas nativas.

Contudo, há necessidade de se aumentar o número de trabalhos publicados para áreas de florestas nativas, que obtiveram apenas 3 publicações no período analisado. A necessidade de trabalhos que tratem sobre as áreas de florestas nativas justifica-se pelo fato de que essas são as maiores áreas do território nacional, além de que os produtos originários dessas regiões são de alto valor agregado.

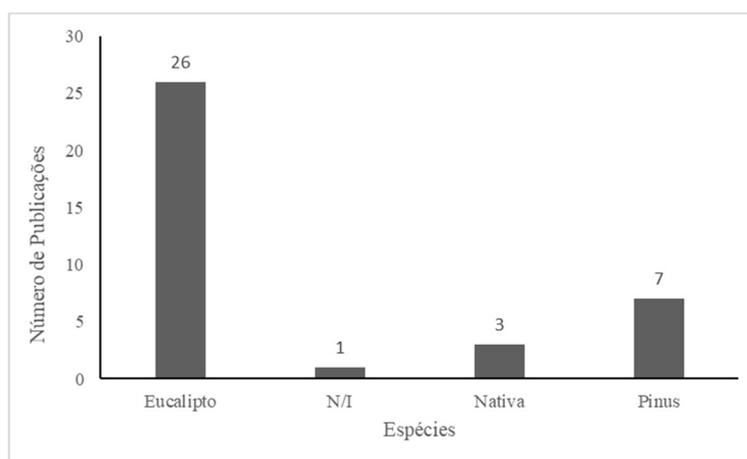
Outro ponto a ser destacado refere-se ao número de trabalhos que utilizaram plantações de eucalipto em seus testes, seguido pelas plantações de pinus (Figura 9). As nomenclaturas N/I deveram-se a um artigo que não mencionou qual espécie florestal estava sendo estudada. Foi observado que 70,27% das publicações abordaram eucalipto, enquanto que 18,91% das publicações abordaram pinus em suas análises. O restante ficou diluído entre publicações que abordaram espécies nativas ou que não citaram a espécie. Tal interesse, no entanto, não é coincidência. Essas são as espécies mais utilizadas na produção de florestas plantadas devido ao rápido desenvolvimento, elevada produtividade por área plantada, boa adaptabilidade aos diversos tipos de clima e solo, rápido retorno do investimento (SOARES et al., 2010; FERREIRA et al., 2017).

Figura 8. Tipos de floresta nas publicações.



Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

Figura 9. Espécies abordadas nas publicações.



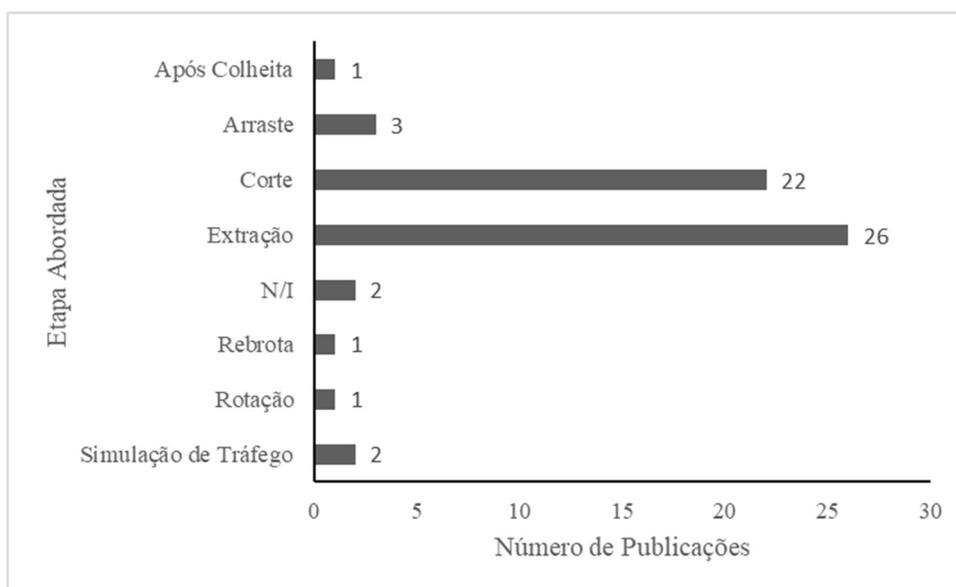
Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE COLHEITAS

O sistema de colheita é determinado, entre outros, pelo destino final dos produtos da colheita e a área e local de exploração. Os artigos analisados revelam a utilização de um arsenal bem diversificado de equipamentos, até mesmo deslocamento por tração animal. Entre as publicações analisadas, foi possível extrair que os trabalhos envolveram diversos meios para sistemas de corte e extração florestal (Figura 10). A nomenclatura N/I deve-se à artigos que não informaram quais equipamentos estavam sendo analisados. As máquinas que mais se destacaram o Harvester, com 12 publicações, o Feller Buncher, com 13 publicações, o Forwarder, com 15 publicações, e a máquina que mais apareceu nas publicações, o Skidder, com 16 publicações. Isso evidencia que a mecanização do setor florestal está crescendo.

Mendes e Seixas (2018) utilizaram a tração animal em meio às colheitas florestais em área de reserva legal a fim de se analisar o impacto que esse tipo de extração causa ao solo. Observou-se que, em comparação ao sistema mecanizado, o sistema de tração animal não chegou ao nível crítico para o desenvolvimento radicular. Por outro lado, há que se reconhecer as limitações e a baixa produtividade desse sistema.

Figura 10. Equipamentos utilizados na colheita florestal



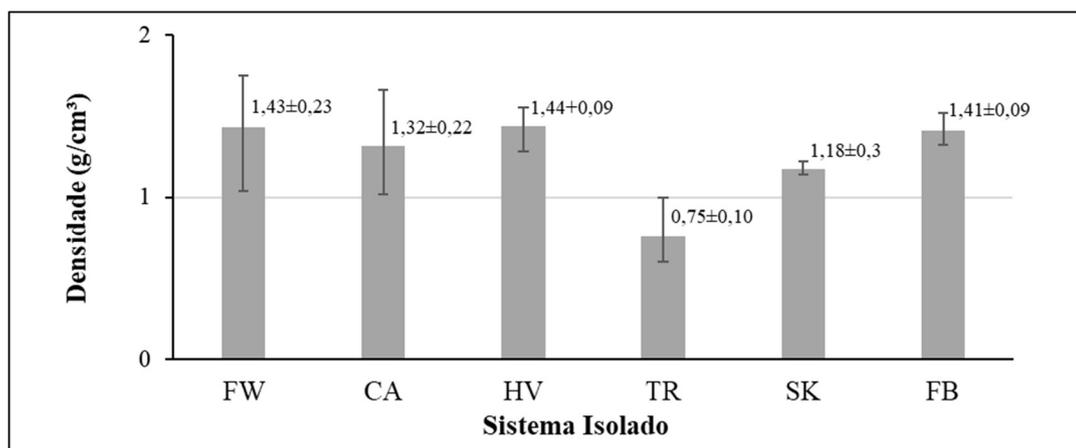
Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

4.4 DENSIDADE DO SOLO E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO

A densidade do solo está representada na Figura 11 para sistemas isolados e na Figura 12 para sistemas compostos. Os valores expostos nas figuras referem-se à média e desvios em relação à média.

A metodologia para avaliação da densidade não foi padronizada, havendo discrepâncias entre os valores devido às características e métodos adotados em cada tipo de trabalho. A medição para a densidade do solo, na maioria dos periódicos, levou em consideração a umidade do solo e o número de passadas de cada maquinário.

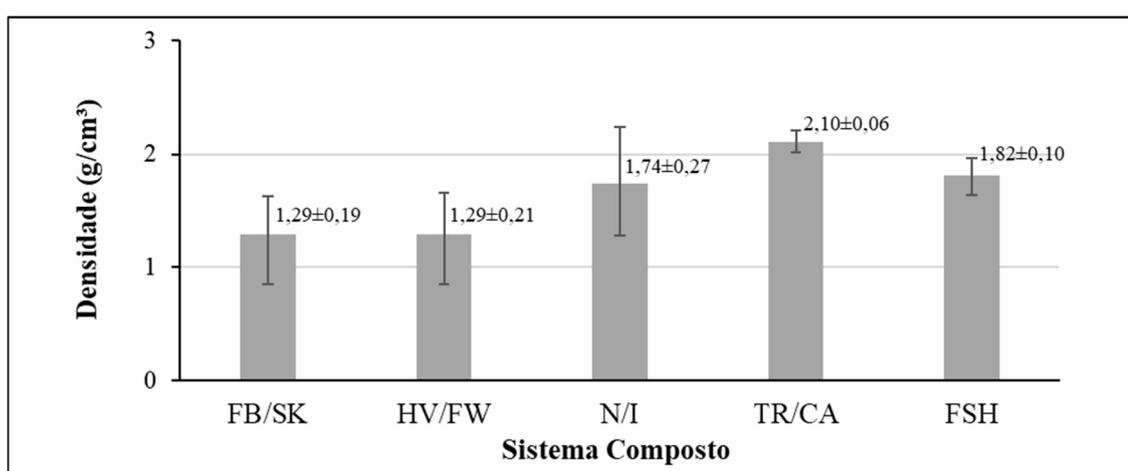
Figura 11. Densidade do solo resultante da atividade de máquinas em sistemas isolados na colheita florestal



Legenda: (i) Barras verticais (média); (ii) barras de erros (valores mínimo e máximo); (iii) rótulos de dados (média e desvio); (iv) FW (Forwarder), (v) CA (caminhão); (vi) HV (Harvester); (vii) TR (trator); (viii) SK (Skidder); e (ix) FB (Feller Buncher).

Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

Figura 12. Densidade do solo resultante da atividade de máquinas em sistemas compostos na colheita florestal.



Legenda: (i) Barras verticais (média); (ii) barras de erros (valores mínimo e máximo); (iii) rótulo de dados (média e desvio); (iv) FB/SK (Feller Buncher e Skidder); (v) HV/FW (Harvester e Forwarder); (vi) N/I (não informado); (vii) TR/CA (trator e caminhão); e FSH (Feller Buncher, Skidder e Harvester).

Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

No estudo realizado por Junior et al. (2008), foi observado que um Harvester compacta o solo igualmente ou mais a um Forwarder totalmente carregado, diferentemente do que foi observado no trabalho de Junior et al. (2007), onde o Forwarder ocasionou um impacto maior quando comparado ao Feller Buncher e Harvester. A figura 11 apresenta os valores de densidade provocados pelo uso das diferentes máquinas na colheita florestal, destacando-se o Harvester, o Forwarder e o Feller Buncher. Szymczak et al. (2014) obteve resultados semelhantes de aumento de densidade em solo úmido, mesmo que a camada residual da colheita tenha diminuído o aumento da densidade do solo. Assim, pode-se concluir que a densidade do solo provocada por essas máquinas também é função das características do clima e do tipo de solo das áreas de plantio.

Analisando-se o caminhão (Figura 11), vê-se que a densidade causada pelo seu uso é prejudicial ao solo. Dedecek e Gava (2005), concluíram que, após o uso desse tipo de máquina, o desenvolvimento de plantas é afetado drasticamente, principalmente entre profundidades de 10 cm a 20 cm em solos argilosos e de 20 cm a 30 cm em solos arenosos.

O Skidder, por sua vez, quando atuando isoladamente (Figura 11), não apresentou aumento na densidade do solo, evidenciado em Lopes et al. 2011. Entretanto, quando trabalhando em conjunto com outras máquinas (Figura 12), como o Harvester e o Feller Buncher, o sistema composto pode ocasionar aumento na densidade do solo em até 80 cm de profundidade (SAMPIETRO et al. 2015). A figura 12 mostra ainda que quando o Skidder fez parte de um sistema composto atuando juntamente com o Feller Buncher, não houve aumento na densidade do solo a ponto de interferir no desenvolvimento radicular (Pincelli e Nunes, 2014).

Dependendo da característica do local, o conjunto de máquinas florestais que mais impactam o solo é o Harvester e o Forwarder. Entretanto quando esse sistema atua na colheita florestal em solo com cobertura de resíduos florestais, não ocasiona compactação e aumento de densidade do solo como observado em Szymczak et al. (2014).

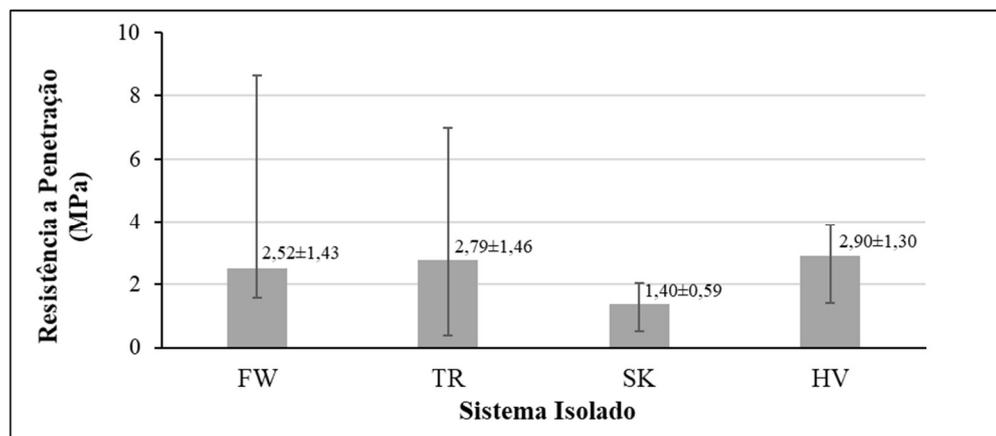
Já o trator foi a máquina que menos impactou o solo quando comparado com outros maquinários utilizados na colheita de forma isolada (Figura 11). Mas, quando utilizado em conjunto com o caminhão (Figura 12), ocasionou um impacto maior na densidade do solo (Seixas e Souza, 2007)

O trabalho que apresentou a maior variação de valores máximos e mínimos foi o que não informou as máquinas utilizadas na colheita florestal (MILDE et al., 2010). Essa

discrepância entre valores pode ser devido à área possuir vários tipos de solo, além do fato de não ter sido especificado o maquinário utilizado, mesmo que se tenha optado por colher amostras em camadas mais superficiais (5 a 15 cm) a fim de se evitar variabilidade espacial da superfície em questão (MILDE et al., 2010).

Os valores de resistência do solo à penetração (RPA) constam das figuras 13 e 14, bem como a média dos valores e os desvios em relação à média.

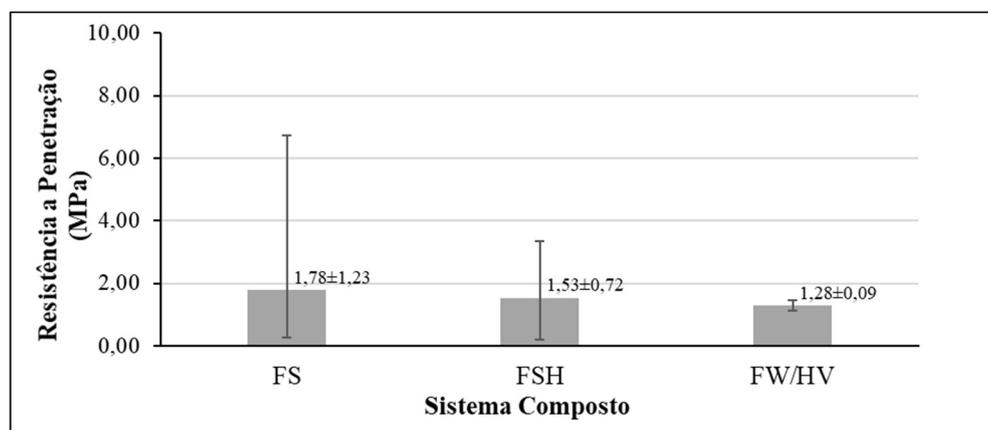
Figura 13. Resistência a Penetração resultante da atividade de máquinas em sistemas isolados na colheita florestal.



Legenda: (i) Barras verticais (média); (ii) barras de erros (valores mínimo e máximo); (iii) rótulo de dados (média e desvio); (iv) FW (forwarder); (v) TR (trato); (vi) SK (skidder); (vii) TA (tração animal); e HV (harvester).

Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

Figura 14. Resistência a Penetração resultante da atividade de máquinas em sistemas compostos na colheita florestal.



Legenda: (i) Barras verticais (média); (ii) barras de erros (valores mínimo e máximo); (iii) rótulo de dados (média e desvio); (iv) FS (Feller buncher e Skidder); (v) FSH (Feller Buncher, Skidder e Harvester); e FW/HV (Forwarder e Harvester).

Fonte: base de dados elaborada a partir dos artigos incluídos nesta revisão sistemática.

Para Greacen e Sands (1980), valores acima de 2,0 mega pascal (MPa) afetam o desenvolvimento radicular, enquanto que valores acima de 3,0 MPa restringem esse desenvolvimento. Analisando a figura 13 de sistemas isolados e a figura 14 de sistemas compostos, vê-se que grande parte das máquinas ocasionam impactos críticos ao desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, a diminuição da produção (ZOU et al., 2000).

Esse é o caso dos valores do Forwarder. Os valores mínimo e máximo foram 1,59 MPa (FERNANDES et al., 2021) e 8,65 MPa (SILVA et al., 2007), respectivamente. A resistência à penetração do solo está diretamente ligada ao número de passadas da máquina na mesma entrelinha, o que mostra que um estudo prévio da região de extração é extremamente necessário para que se possa evitar os problemas de compactação do solo.

A resistência à penetração do solo também está associada à estação do ano na qual ocorre a colheita florestal. Se o período é chuvoso, os impactos são maiores porque as características do solo ficam alteradas, por exemplo a umidade, e o solo torna-se mais susceptível à compactação. A estação chuvosa contribuiu também para o aumento da resistência à penetração do solo provocada pelo trator (PAULUCIO et al., 2014).

Já para os Harvester, os valores ficaram acima dos valores críticos devido a compactação em camada mais inferiores do solo, que é a tendência natural do solo após diversos ciclos florestais, ou seja, nas camadas superficiais a compactação foi abaixo do ponto crítico de desenvolvimento de raízes, este sendo influenciado pelo resíduo da colheita de toras curtas (LOPES et al., 2015).

Outro ponto a se destacar são os valores do Skidder e da tração animal, os quais quase não alteraram a resistência do solo à penetração. Para o Skidder, isso pode ter sido advindo da utilização de traçado de esteira e a carga utilizada no arraste ser inferior ao que se é observado comumente (FERNANDES et al., 2008). Contudo, tal justificativa diverge do que é apresentado por Lopez et al. (2011), quando este cita que a utilização de traçado de esteira não diminuiu a compactação do solo, mas apenas facilitou a aderência do equipamento durante a colheita.

Interessante observar que o estudo realizado por Szymczak et al., (2021) que utilizou o conjunto Forwarder e Harvester (Figura 14), foi o que obteve os menores valores para a compactação do solo, que nem sequer chegaram ao valor de alarme para desenvolvimento de raízes (2,0 MPa). Entretanto isso está associado à peculiaridade do sítio florestal em questão que possuía 90 toneladas de resíduos de colheita. Assim, restou demonstrado que o resíduo proveniente da colheita florestal diminuiu a compactação do solo mediante os traçados.

Já os sistemas compostos por Feller Buncher e Skidder Feller Buncher, Skidder e Harvester ocasionam um elevado valor tratando-se da resistência à penetração do solo. Tal valor é proveniente, principalmente, pelo número de passadas do maquinário, onde há, baixa compactação do solo nas camadas superficiais, diferente do que ocorre nas camadas mais profundas, implicando assim a necessidade de adotar métodos para prevenção da compactação nessas profundidades (LIMA et al., 2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo geral deste trabalho de se avaliar a compactação do solo em relação à cada tipo de colheita florestal mecanizada de madeira no Brasil, nos últimos 20 anos, por meio de uma revisão sistemática, foi alcançado. Entretanto mais estudos são necessários para que as variáveis analisadas possam ter ampla utilização. A grande maioria dos estudos incluídos nesta revisão sistemática ocorreram na região sudeste do país e, devido às características de cada região, os resultados obtidos em um estudo podem não ser generalizados para as demais regiões. Apesar disso, os resultados apresentados nesta revisão sistemática constituem um bom guia para pesquisadores da área.

A principal dificuldade encontrada para a condução deste trabalho foi a escassez de publicações de estudos de tão importante tema, principalmente quando considerada a importância da produção do país no cenário mundial, a ampla extensão territorial do país, os diferentes climas de cada região, as peculiaridades de cada solo, o período do ano em que ocorre a colheita florestal, o sistema de colheita empregado, o maquinário utilizado na colheita, entre outras variáveis importantes para a realização de um trabalho comparativo.

Algumas informações cruciais como ondulação do terreno e época do ano do estudo não foram inseridas na maioria das publicações, ocasionando assim perdas de informações. Também não há um padrão estabelecido para análise, dificultando ainda mais a possibilidade de se fazer comparativos entre os diferentes estudos e seus resultados.

Entretanto, foi possível observar que máquinas semelhantes podem infligir diferentes tipos de dano ao solo, fator esse ligado principalmente ao clima e composição do solo no qual o sistema de colheita está inserido. Esse é um dado importante para a fase de planejamento da colheita florestal. A não adequação do sistema de colheita às características do sítio florestal implica na produtividade, nos custos de produção, no retorno financeiro, nos danos causados ao solo e nos ciclos de produção futuros.

As principais variáveis que afetam a compactação do solo são a umidade, o número de passadas do maquinário, a densidade do solo e a resistência à penetração. Porém, como esses valores diferem entre os diversos periódicos, quaisquer análises que possam vir a serem feitas sobre estes não serão as mais assertivas

Como recomendação de estudos futuros, sugere-se a utilização de artigos, trabalhos, manuscritos, que possam possuir características semelhantes entre si, como região de estudo, relevo, solo e época do ano. Acrescenta-se também a necessidade de estudo de outros tipos de florestas, necessitando acréscimo de mais publicações que discorram sobre florestas nativas e outros tipos de espécies florestais.

O número elevado de artigos que tratam da compactação do solo por colheita mecanizada em florestas plantadas poderá contribuir para que próximos trabalhos realizados nessas áreas possuam um entendimento melhor dos fatores que, individualmente ou coletivamente, impactam a compactação do solo e, conseqüentemente, a produção de produtos florestais tão importantes para a economia do país.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, G. D. C *et al.* Avaliações de sítio e produtividade em plantios de *Eucalyptus urograndis* com 3 anos de idade em São Paulo, Brasil. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 2011.

ANDRADE, G. D. C *et al.* *Soil compaction caused by harvest and logging operations in eucalyptus forests in coarse-textured soils from northeastern Brazil Soil compaction caused by harvest and logging operations in eucalyptus forests in coarse-textured soils from northeastern.* Brazil. *Ciência e Agrotecnologia*, 41, p. 191-200, 2017.

BARBOSA *et al.* Análise de posturas na colheita florestal semimecanizada em áreas declivosas. *Revista Árvore*, 38, p. 733-738, 2014.

BRASIL. Diretrizes metodológicas: elaboração de revisão sistemática e metanálise de ensaios clínicos randomizados. In: Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência TeIEDdCe, Tecnologia., editors. Brasília, DF.2012.

CARVALHO, A. N. D.; CARVALHO, T. L. G. S. D. *Impactos Ambientales Del Manejo Forestal Comunitario En El Bosque Nacional Del Tapajós.* 11, 2019-12-16 2019. Artigos Científicos.

CONNECT AMERICAS. Máquinas Karnal. Disponível em: <
<https://connectamericas.com/company/m%C3%A1quinas-karnal>>. Acesso em: 4 nov. 2021.

COUTO, R. *et al.* Compactação e recalque superficial de um latossolo vermelho em condição de campo e laboratório. 2012-08-09 2013. Dissertação.

DAVID, H. C.; FIEDLER, N. C.; BAUM, L. ERGONOMIA E SEGURANÇA NA COLHEITA FLORESTAL: UMA REVISÃO ANTE A NR 17 E A NR 31. Goiânia, 2014. Disponível em: <http://www.conhecer.org.br/enciclop/2014a/AGRARIAS/ergonomia.pdf>. Acesso em: 08 de outubro.

DEDECEK, R. A.; GAVA, J. L. Influência da compactação do solo na produtividade da rebrota de eucalipto. *Revista Árvore*, 29, p. 383-390, 2005.

DIAS JUNIOR, M. D. S.; LEITE, F. P. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural de um latossolo vermelho-amarelo cultivado com eucalipto na região de Peçanha-MG. *Revista Árvore*, 27, p. 343-349, 2003.

DIAS, M. D. S *et al.* Avaliação da sustentabilidade da estrutura de argissolos em sistemas florestais. *CERNE*, 8, n. 1, p. 103-114, 2002.

FERNANDES, H. C *et al.* Avaliação da resistência do solo à penetração em razão de cargas aplicadas pelos rodados de duas máquinas florestais e pelo arraste de madeira. 2008-01 2008. Artigo.

FERNANDES, H. C.; SOUZA, A. P. D. Compactação de um latossolo vermelho causada pelo tráfego do "forwarder". *Revista Árvore*, 27, p. 279-284, 2003.

FERRAZ, C. P. A *et al.* Análise de danos e impactos ambientais por meio de rede de interação em colheita florestal / Analysis of environmental damage and impacts through forest harvest interaction network. 2, 2019-12-27 2019. Artigos originais.

FERREIRA, D. H. A. A *et al.* Crescimento e Produção de Eucalipto na Região do Médio Paraíba do Sul, RJ. **Floresta e Ambiente**, 24, 2017.

GALVÃO, C. M *et al.* Revisão sistemática: recurso que proporciona a incorporação das evidências na prática da enfermagem. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, 12, p. 549-556, 2004.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 23, p. 183-184, 2014.

GAVA, J. L. Avaliação da qualidade da preparação do solo em área de cultivo mínimo plantada com eucalipto. <https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb>, 2018-03-22 2003. Artigos Científicos.

GREACEN, E. L.; SANDS, R. Compaction of forest soils. A review. *Australian journal of soil research*, 1980.

IBA, I. B. D. Á. Relatório Anual ano base 2019. 2020. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf>. Acesso em: 02/10/2021.

INKOTTE, J.; MARTINS, R. C. C.; SCARDUA, F. P.; PEREIRA, R. S. Methods of evaluation of nutrient cycling in the Cerrado biome: a systematic review. 29, 2019-07-03 2019. Artigo de Revisão.

JUNIOR, M. D. S. D *et al.* Soil compaction due to forest harvest operations. 42, 2010-02-03 2007. SOLOS.

JUNIOR, M. D. S. D.; SILVA, S. R.; SANTOS, N. S. D.; ARAUJO-JUNIOR, C. F. Avaliação da compactação do solo de dois argissolos causada pelas operações de colheita florestal. Avaliação da compactação do solo de dois argissolos causada pelas operações de colheita florestal, 32, n. 6, p. 2245-2253, 2008-12-01 2008.

LEITE, E. D. S *et al.* Compactação do solo causada pelo harvester e intensidade de tráfego do forwarder na colheita florestal. Scientia Florestalis, 48, n. 2318-1222, 2020.

LIMA, J. S. D. S.; OLIVEIRA, P. C. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. Revista Árvore, 32, p. 931-938, 2008.

LOPES, E. D. S *et al.* Compactação de um Solo Submetido ao Tráfego do Harvester e do Forwarder na Colheita de Madeira. Compactação de um Solo Submetido ao Tráfego do Harvester e do Forwarder na Colheita de Madeira, 22, n. 2, p. 223-230, 2015/06/19 2015.

LOPES, E. D. S *et al.* Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. 2011.

LOPES, E. D. S *et al.* Compaction of a latosol subjected to skidder traffic with different wheeled. 41, 2011-09-22 2011. Artigos.

LOPES, S. E *et al.* Caracterização das propriedades compactação de um solo de uso florestal submetido ao tráfego de arraste de madeira-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. 2004-08-10 2006. Artigo.

MALINOVSKI, R. A.; MALINOVSKI, J. R. Colheita. UFPR, 2003. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=262&subject=Col. Acesso em: 08 de outubro.

MARTINS, P. C. C.; DIAS JUNIOR, M. D. S. Níveis de pressões induzidas e compactação causada pelas operações de colheita florestal. CERNE, 19, p. 83-91, 2013.

MARTINS, P. C. C.; DIAS JUNIOR, M. D. S. Compactação do solo durante as operações de colheita em cinco solos tropicais de diferentes texturas sob florestas de eucalipto. Ciência e Agrotecnologia, 42, p. 58-68, 2018.

MELLO-IVO, W. M. P. D *et al.* Efeito da colheita seletiva de madeira sobre algumas características físicas de um latossolo amarelo sob floresta na Amazônia Central. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 30, p. 769-776, 2006.

MENDES, J. C. T.; SEIXAS, F. Avaliação dos impactos da colheita florestal nos atributos físicos do solo em uma reserva legal. Scientia Florestalis, 46, p. 143-155, 2018.

MILDE, G. A.; DEDECEK, R. A. Unidades de colheita: estratégia para evitar a compactação dos solos florestais. Revista Árvore, 34, p. 1075-1083, 2010.

MLENEK, D. C *et al.* REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE DETECÇÃO DE ÁRVORES UTILIZANDO DADOS DE SENSORIAMENTO REMOTO. 5, 2019-08-26 2019. Artigos.

PAULUCIO, F. F *et al.* AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO EM ÁREA DE CERRADO sensu stricto ATRAVÉS DO MAPEAMENTO DA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO. <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/biodiversidade>, 2014-04-02 2014. Artigos.

PAYÁ, T. I. D. A *et al.* EFEITO DE DIFERENTES INTENSIDADES DE TRÁFEGO DO FELLER DIRECIONAL E SKIDDER NA COMPACTAÇÃO DE UM NITOSSOLO BRUNO. Revista Árvore, 43, 2019.

PINCELLI, A. L. P. S. M.; SEIXAS, F. Compactação e fertilidade do solo após colheita do eucalipto utilizando Feller Buncher e Skidder. CERNE, 20, p. 191-198, 2014.

RODRIGUES, Carla Krulikowski, 1989 – Colheita e transporte florestal / Carla Krulikowski Rodrigues. – Curitiba : [s.n.], 2018. 68 p. : il.

RODRIGUES, C. K.; LOPES, E. D. S. Análise espacial da compactação do solo causada pelo sistema de colheita de madeira de árvores inteiras. Revista Ceres, 65, p. 227-233, 2018.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M. C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. Brazilian Journal of Physical Therapy, 11, p. 83-89, 2007.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. D. S. *Compaction of a cambisol caused by forest harvesting machines with spatialized geostatistics*. 46, 2016-10-05 2016. Artigos.

SAMPIETRO, J. A.; LOPES, E. D. S.; REICHERT, J. M. COMPACTON CAUSED BY FELLER-BUNCHER AND SKIDDER TRAFFIC IN AN ENTISOL UNDER DISTINCT MOISTURES. 25, 2015-04-01 2015. Nota Técnica.

SANTOS, H. G. D. *et al.* Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. - Portal Embrapa. Embrapa Solos, 2018.

SEIXAS, F.; OLIVEIRA JÚNIOR, E. D. D. Compactação do solo devido ao tráfego de máquinas de colheita de madeira. Scientia Forestalis, n. 60, p. 73-87, 2001.

SEIXAS, F.; SOUZA, C. R. D. Avaliação e efeito da compactação do solo, devido à frequência de tráfego, na produção de madeira de eucalipto. Revista Árvore, 31, p. 1047-1052, 2007.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO (SFB). Sistema Nacional de Informações Florestais – SNIF. Brasília, 2019. Disponível em:< <http://snif.florestal.gov.br/pt-br/>>. Acesso em: 28 de agosto de 2021.

SFB, S. F. B. SNIF - Florestas Naturais ano base 2019. 2020. Disponível em: <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/os-biomas-e-suas-florestas>. Acesso em: 02 de outubro.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. D. S. Camada de resíduos florestais e pressão de preconsolidação de dois latossolos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42, p. 89-93, 2007.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. D. S. Avaliação da intensidade de tráfego e carga de um forwarder sobre a compactação de um Latossolo Vermelho-Amarelo. *Revista Árvore*, 35, p. 547-554, 2011.

SILVA, S. R. *et al.* Alterações do solo influenciadas pelo tráfego e carga de um "forwarder" nas entrelinhas de uma floresta de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, p. 371-377, 2007.

SOARES, N. S. *et al.* Competitividade da cadeia produtiva da madeira de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, 34, p. 917-928, 2010.

SZYMCZAK, D. A. *et al.* Compactação do solo causada por tratores florestais na colheita de *Pinus taeda* L. na região sudoeste do Paraná. *Revista Árvore*, 38, p. 641-648, 2014.

ZOU, C. B.; BUCHAN, G.; SANDS, R.; HUDSON, I. Least limiting water range: A potential indicator of physical quality of forest soils. 2000.