

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

EDUARDA RANÇÃO COSTA

QUANTIFICAÇÃO DE VOLUME, BIOMASSA E CARBONO DO
FUSTE EM DIFERENTES SISTEMAS SILVIPASTORIS NO SUL DO
ESPÍRITO SANTO

JERÔNIMO MONTEIRO
ESPÍRITO SANTO

2023

EDUARDA RANÇÃO COSTA

QUANTIFICAÇÃO DE VOLUME, BIOMASSA E CARBONO DO
FUSTE EM DIFERENTES SISTEMAS SILVIPASTORIS NO SUL DO
ESPÍRITO SANTO

Monografia apresentada ao
Departamento de Ciências
Florestais e da Madeira da
Universidade Federal do Espírito
Santo, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheira
Florestal.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2023


EDUARDA RANÇÃO COSTA

QUANTIFICAÇÃO DE VOLUME, BIOMASSA E CARBONO DO
FUSTE EM DIFERENTES SISTEMAS SILVIPASTORIS NO SUL DO
ESPÍRITO SANTO


Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.

Aprovada em 11 de Dezembro de 2023.


COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **ADRIANO RIBEIRO DE MENDONÇA**
Data: 20/12/2023 11:53:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **NÍVEA MARIA MAFRA RODRIGUES**
Data: 20/12/2023 10:22:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

MSc. Nívea Maria Mafra Rodrigues
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Documento assinado digitalmente
 **MARINO SALGARELLO COELHO**
Data: 20/12/2023 08:47:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

MSc. Marino Salgarello Coelho
Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo
Examinador

*“Não fui eu que ordenei a você?
Seja forte e corajoso!
Não se apavore nem desanime,
pois o Senhor, o seu Deus,
estará com você por onde você andar.”*

Josué 1:9

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de realizar um sonho.

Aos meus pais, Adriana e Amauri, por sempre me incentivarem, terem apoiado minhas ideias e por nunca terem me deixado desistir do meu objetivo. Vocês deram o melhor possível para que eu pudesse conquistar essa vitória e aqui estou. Amo vocês!

Aos amigos que construí ao longo dessa trajetória, em especial Sabrina, Lucas Caldas, Matheus, Luiz Otávio, João Pedro e Emanuel, pelas conversas, desabafos e incentivos, obrigada por todo apoio, vocês são muito especiais para mim.

Aos amigos que deixei em São José dos Campos para vir estudar em outro estado, especialmente Julia, Ingrid, Laíra e Carlos, que sempre se importaram comigo e por não terem me abandonado. Amo vocês demais e estou com muitas saudades!

Aos amigos que fiz na empresa Rio-Minas Geologia, João Vitor e Karen, nessa reta final vocês foram essenciais para mim. Obrigada por tudo!

A minha família por todo apoio e preocupação.

Ao professor Adriano Ribeiro de Mendonça pela orientação, pela paciência, pelos ensinamentos, pelas sugestões de melhoria neste trabalho, pela disponibilidade de levar a equipe para coleta de dados em campo, meu muitíssimo obrigado!

Ao professor Gilson Fernandes da Silva, pela oportunidade de integrar o Laboratório de Mensuração e Manejo Florestal - LaMFlor e por todo conhecimento transmitido durante a graduação.

Aos amigos do LaMFlor por todo apoio, por todos momentos, por todos os campos, por todos aprendizados, e em especial Nívea, Carem e Lucas Caldas, por me ensinarem e me inspirarem tanto.

A todos que auxiliaram a coleta de dados em campo para realização deste trabalho, e a todos que contribuíram na minha trajetória, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

No contexto das estratégias para enfrentar as mudanças climáticas, é crucial considerar o potencial das florestas plantadas. Dentre os modelos de plantio, os sistemas silvipastoris com eucalipto oferecem uma combinação eficaz de produção de madeira e pastagem sustentável, promovendo benefícios econômicos e ambientais. Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo geral quantificar o estoque volumétrico, a biomassa e o carbono do fuste de árvores em diferentes sistemas silvipastoris, no município de Jerônimo Monteiro, sul do Espírito Santo. A área de estudo é composta por diferentes modelos de sistemas silvipastoris, conduzidos sob o delineamento em blocos casualizados. Os modelos de sistemas presentes na área são: 1) Monocultivo de capim marandu (*Urochloa brizantha* cv *marandu*); 2) Monocultivo de eucalipto (híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*); 3) Sistema silvipastoril com capim marandu e eucalipto; 4) Sistema silvipastoril com capim marandu, eucalipto e leucena (*Leucaena leucocephala*); 5) Sistema silvipastoril com capim marandu e araribá (*Centropogon tomentosus* Guillem. ex Benth.). Foram analisados os tratamentos 2, 3, 4 e 5. Neste levantamento foram coletadas as seguintes informações: número de árvores, diâmetro a 1,3m do solo (D) e altura total (H) das árvores das espécies de eucalipto e araribá. Foram avaliados dois modelos volumétricos por meio do coeficiente de determinação ajustado, raiz do erro quadrático médio e análise gráfica dos resíduos. O modelo selecionado para estimar o volume das árvores dos tratamentos foi o de Schumacher e Hall. A quantificação de biomassa e carbono foi realizada por método indireto considerando valores de referência encontrados na literatura para a variável densidade média da madeira e teor de carbono. Considerando a posição topográfica dos blocos e a infestação por formigas cortadeiras que aconteceu nos tratamentos referentes ao bloco sudoeste, o bloco sul apresentou maior produção volumétrica, maior quantidade de biomassa e maior potencial de sequestro de carbono, em relação ao bloco sudoeste.

Palavras-chave: Eucalipto. Araribá. Mensuração. Produção florestal. Mudanças climáticas.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo Geral.....	3
1.1.2 Objetivos Específicos.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 O Papel das Florestas no Contexto das Mudanças Climáticas.....	4
2.2 Sistemas Silvipastoris.....	5
2.3 Volumetria.....	6
2.4 Biomassa e Carbono Florestal.....	7
3 METODOLOGIA.....	10
3.1 Caracterização da área de estudo.....	10
3.2 Coleta de dados.....	11
3.2.1. Inventário florestal.....	11
3.2.2. Cubagem rigorosa.....	13
3.3 Modelos volumétricos avaliados.....	14
3.4 Avaliação dos modelos de regressão.....	15
3.5 Produção das espécies florestais analisadas.....	15
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
4.1 Análise da acurácia dos modelos volumétricos.....	18
4.2 Caracterização dendrométrica das espécies dos sistemas silvipastoris analisados.....	20
4.3 Produção do sistema silvipastoril.....	22
4.4 Estoque de biomassa e carbono.....	24
5 CONCLUSÕES.....	27
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição dos blocos implantados de diferentes tipos de sistemas silvipastoris.....	11
Tabela 2 – Coeficientes e estatísticas de desempenho dos modelos volumétricos para araribá e eucalipto.....	18
Tabela 3 – Caracterização dendrométrica dos diferentes sistemas silvipastoris em Jerônimo Monteiro, ES.....	21
Tabela 4 – Produção florestal dos diferentes sistemas silvipastoris em Jerônimo Monteiro, ES	23
Tabela 5 – Biomassa e carbono em diferentes sistemas silvipastoris em Jerônimo Monteiro, ES	25

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo	10
Figura 2 – Coleta de altura (H) de araribá com auxílio da régua telescópica.....	12
Figura 3 – Coleta dos diâmetros dos fustes das árvores em pé com uso do dendrômetro Criterion RD 1000	14
Figura 4 – Volumes observados versus volumes estimados em m^3 para os modelos de Schumacher e Hall e Spurr para as espécies de Araribá (A) e Eucalipto (B).....	19
Figura 5 – Resíduos <i>versus</i> volumes estimados em m^3 para os modelos de Schumacher e Hall e Spurr para as espécies de Araribá (A) e Eucalipto (B).....	20

1 INTRODUÇÃO

As discussões sobre as mudanças climáticas, iniciadas na década de 1980, alcançaram um marco significativo com a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) em 1988 (Silva, 2020). O aumento acentuado na concentração de gases de efeito estufa (GEE's) na atmosfera ao longo do último século, resultado das atividades humanas (IPCC, 2007), tem motivado a comunidade internacional a instituir e desenvolver organizações e estratégias destinadas ao gerenciamento dessa questão.

Na sequência desses esforços, a Conferência das Partes (COP), iniciada em 1995, deu origem a diversos mecanismos, entre os quais se destaca o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) (Santos, 2016). Estabelecido por meio dos tratados do Protocolo de Quioto, o MDL fornece aos países desenvolvidos a oportunidade de financiar projetos para redução de emissões de carbono ou ao sequestro de carbono em nações emergentes (UNFCCC, 2023). Essa abordagem visa não apenas mitigar as emissões, mas também fomentar o desenvolvimento sustentável em países em crescimento.

Outra iniciativa relevante, especialmente para o Brasil, é o Plano de Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal (REDD+). Este mecanismo possibilita a geração de créditos de carbono com base em quantidade de CO₂ não emitida mediante conservação de florestas existentes (UNFCCC, 2023). Os créditos podem ser negociados no mercado de carbono voluntário, fornecendo incentivos econômicos para a preservação ambiental e a mitigação das mudanças climáticas (Carlos *et al.*, 2022). Estas ações refletem o compromisso global e a busca de soluções baseadas em evidências científicas para enfrentar os desafios climáticos em curso.

Neste contexto, é crucial considerar não apenas o papel das florestas nativas existentes, mas também o potencial das florestas plantadas. Em 2022, a área total de árvores plantadas no Brasil foi de 9,94 milhões de hectares, sendo o eucalipto a espécie predominante, ocupando cerca de 76% dessa área, totalizando 7,6 milhões de hectares (IBÁ, 2023). Essas florestas desempenham um papel importante no sequestro

de carbono, contribuindo para mitigar as emissões e promover a sustentabilidade ambiental (Souza *et al.* 2019).

Além dos monocultivos, destacam-se os sistemas consorciados na mitigação dos efeitos da emissão de carbono. Os sistemas agroflorestais, compatíveis com a abordagem do mecanismo REDD+, têm a capacidade de fixar carbono e conservar paisagens florestais (Schroth *et al.*, 2015). Dentre esses sistemas, os sistemas silvipastoris (SSP's) apresentam potencial para sequestrar e armazenar carbono na biomassa, devido à sua maior produtividade por unidade de área em comparação aos sistemas de plantio tradicionais (Macedo, 2000). Agindo como sumidouros de carbono e contribuindo para a redução da concentração de GEE's (Schettini *et al.*, 2021), os SSP's destacam-se como uma abordagem sustentável para enfrentar os desafios climáticos em curso.

Espécies como leguminosas exóticas, por exemplo *Acacia mangium*, *A. auriculiformis* e *A. angustissima*, e a nativa *Mimosa artemisiana*, também são utilizadas para a produção de madeira e trazem vantagens em sistemas silvipastoris. A combinação de leguminosas fixadoras de nitrogênio e forrageiras herbáceas possibilita a criação de sistemas sustentáveis, melhorando a fertilidade do solo e diminuindo as chances de novos processos de degradação. (Carvalho *et al.*, 2002)

Os SSP's são alternativas sustentáveis para o uso do solo, principalmente na região sul do Espírito Santo, que possui extensas áreas cobertas por pastagens destinadas a bovinocultura (Wendling *et al.*, 2021). Este sistema promove um aumento na produção animal, tornando a atividade regional ecologicamente viável e financeiramente lucrativa (Carvalho, 2019). Considerando que o estado possui grande quantidade de pastagens degradadas (Souza *et al.*, 2021), esse sistema pode resultar em uma importante forma de recuperação de pastagens além de uma fonte de renda na economia capixaba.

Por meio da combinação de árvores dispersas na pastagem, em divisas e em quebra-ventos, os SSP's auxiliam na redução da erosão do solo, melhoram o bem-estar dos animais, ajudam na conservação da água e do solo, diversificam a produção e ampliam a renda dos produtores (Wendling *et al.*, 2021). Ao mesmo tempo em que promovem o aumento da biodiversidade local criando habitats diversos, oferecendo

abrigo e alimento, e conectando corredores ecológicos, os SSP's desempenham um papel essencial no sequestro de carbono atmosférico, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (Figueiredo, 2022). Nesse contexto, são justificáveis pesquisas voltadas ao estoque de volume, biomassa e carbono presente em SSP's.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Quantificar o estoque volumétrico, a biomassa e o carbono do fuste de árvores presentes em diferentes sistemas silvipastoris no município de Jerônimo Monteiro, sul do Espírito Santo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar modelos de volume individual de árvores para cada espécie selecionada;
- Estimar volume, biomassa e carbono do fuste das árvores das espécies eucalipto e araribá presentes nos diferentes sistemas silvipastoris; e
- Avaliar os tipos de sistemas implantados em relação à capacidade de fixação de carbono do fuste.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O Papel das Florestas no Contexto das Mudanças Climáticas

A exploração não planejada dos recursos naturais, juntamente com a queima de combustíveis fósseis e as alterações no uso da terra, é identificada como uma das principais atividades humanas que estão agravando as mudanças climáticas (IPCC, 2007). Consequentemente, acontecem fenômenos como o aquecimento global, causado pelo excesso de GEE's que se acumulam na atmosfera. A presença desses gases na atmosfera cria uma barreira que bloqueia a radiação solar que passa pela atmosfera terrestre, impedindo-a de escapar de volta para o espaço, resultando no aumento da temperatura na Terra (Assad *et al.*, 2015).

Soluções destinadas a prevenir ou mitigar os impactos do aquecimento global e do efeito estufa estão amplamente em debate. Uma das estratégias para diminuir a concentração de GEE's é a integração da biomassa vegetal por meio de projetos de reflorestamento, além de alternativas como a redução das emissões resultantes da queima de combustíveis fósseis e o controle das emissões de GEE's do desmatamento florestal (Silva, 2020).

Os relatórios do IPCC apontam para uma situação preocupante quanto ao aumento da temperatura no planeta, que podem causar longos períodos de déficit hídrico, o que pode ser letal para muitas espécies vegetais (IPCC, 2014). As florestas desempenham um papel fundamental no enfrentamento das ameaças do aquecimento global e do efeito estufa, uma vez que têm a capacidade de capturar e armazenar carbono, evitando, assim, as concentrações de CO₂ na atmosfera e contribuindo para mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Sanquetta, 2002).

Em áreas degradadas, a revegetação é uma estratégia de conservação fundamental para melhorar os atributos físicos e químicos dos solos, além de fornecer, por meio da cobertura vegetal, a proteção para diminuir a perda de sedimentos por erosão, principalmente por erosão hídrica (Pereira e Rodrigues, 2011).

O dossel da floresta exerce influência ao atenuar a radiação solar, resultando em uma temperatura média do solo menor dentro da floresta. Essa variação térmica pode impactar o comportamento das espécies vegetais durante a sucessão ecológica em

florestas tropicais, pois está diretamente ligada às condições ambientais locais (Pezzopane *et al.*, 2002). Portanto, o cultivo de florestas se destaca como alternativa para mitigar os impactos das mudanças climáticas e da degradação ambiental (Sanquetta *et al.*, 2011). Ações adicionais incluem evitar o desmatamento, adotar o manejo florestal sustentável e promover o uso da madeira em produtos e construções duráveis, sendo também substituto de energias fósseis. Apesar do reconhecido destaque das florestas plantadas no Brasil, é imperativo refinar substancialmente as estimativas de biomassa e carbono, reduzindo a incerteza das informações para atender às demandas internas e aos compromissos internacionais do país (Sanquetta *et al.*, 2018).

2.2 Sistemas Silvopastoris

Os sistemas silvipastoris (SSP) são uma modalidade de sistemas agroflorestais e se caracterizam por integrar componentes lenhosos, herbáceos e animais herbívoros (Carvalho e Xavier, 2012), com o propósito de maximizar a produtividade e a sustentabilidade da terra (Silva *et al.*, 2023). A diversificação dos elementos dentro desse sistema promove novas oportunidades de mercado, tornando-se uma estratégia que pode mitigar possíveis desafios econômicos, podendo ser um diferencial competitivo do agronegócio brasileiro, tanto no setor pecuário quanto na indústria de base florestal (Lustosa, 2008; Silva e Ribaski, 2006).

Esses sistemas multifuncionais oferecem benefícios econômicos e ambientais, com potencial de intensificar a produção, recuperando a capacidade produtiva do solo. Os SSP's também são conhecidos por reabilitar pastagens degradadas, aumentando o estoque de carbono e nitrogênio em solos tropicais e subtropicais (Battisti *et al.*, 2018). O aumento da cobertura de árvores em pastagens degradadas pode contribuir para múltiplos serviços ecossistêmicos, além de contribuir para a biodiversidade (Silva *et al.*, 2020).

Dentre as espécies do componente arbóreo, destacam-se as do gênero *Eucalyptus*, que são as mais utilizadas na composição de sistemas agroflorestais (Gandini, 2018). Além do eucalipto, o araribá (*Centrolobium tomentosum* Guillem. ex Benth.) também é indicado para plantio em sistemas silvipastoris, apresentando uma tendência à

melhora nos atributos químicos dos solos (Effgen, 2021). É uma espécie nativa da América do Sul, encontrada principalmente em regiões tropicais e subtropicais. Trata-se de uma espécie caducifólia, que perde suas folhas completamente durante a estação seca e exibe um conjunto de características de crescimento e regeneração que indicam sua classificação como uma espécie secundária inicial (Carvalho, 2003). Segundo Bastos (1952), o araribá apresenta crescimento moderado a rápido, com boa qualidade de madeira para diversos usos e grande potencial silvicultural.

Os SSP's possuem um grande potencial para sequestrar carbono, quando comparado à monocultivo de pastagens ou culturas agrícolas, que crescem em condições ecológicas semelhantes aos SSP's (Paciullo *et al.*, 2017). A conversão de pastagens para povoamentos florestais com gramínea no piso florestal pode aumentar a profundidade e a distribuição do enraizamento, quantidade e qualidade de entrada de matéria orgânica e, portanto, aumentar o sequestro de carbono (Delarmelina, 2019).

2.3 Volumetria

A mensuração do volume de madeira desempenha um papel crucial no setor florestal, sendo fundamental para estabelecer correlações que permitem a avaliação da diversidade de espécies na produção madeireira e a análise da capacidade produtiva de diferentes tipos de florestas. Esses dados são fundamentais para os gestores florestais tomarem decisões estratégicas e operacionais no planejamento (Oliveira *et al.*, 2014).

A obtenção do volume de uma árvore ou parte dela é realizada por meio da aquisição de variáveis que possibilitem essa quantificação volumétrica. O volume pode ser encontrado por métodos diretos (destrutivos), e métodos indiretos (não destrutivos) (Sanquetta e Balbinot, 2004).

No método direto, o volume das árvores é medido para um conjunto de árvores que são abatidas (Smaniotto *et al.*, 2014). Quando a árvore é seccionada em diversas toras, utiliza-se o método do xilômetro, onde se mergulham os toretes num tanque com água e é medido o deslocamento do nível de água no tanque, sendo o produto da área do tanque pelo deslocamento do nível de água o volume real da tora (Lima *et al.*, 2016).

Já entre os métodos indiretos, o volume é obtido por meio da cubagem rigorosa, que envolve a medição de diâmetros sucessivos ao longo do fuste da árvore, com comprimentos pré-definidos (Campos e Leite, 2017), sendo o método mais recorrente em trabalhos acadêmicos. De acordo com Nicoletti (2011), este método consiste em aferir o diâmetro na base (0,10 m), e nas alturas de 0,50 m, 1,0 m, a 1,30 m no diâmetro a altura do peito (D), 2,0 m, e repetir a medição, mas a cada 2,0 m até um diâmetro mínimo comercial.

Os métodos comumente utilizados para o cálculo do volume são Smalian e Huber, principalmente pela facilidade de uso das fórmulas (Nicoletti, 2011). Para a execução da cubagem, podem ser utilizados modelos de equações volumétricas, realização das estimativas por imagem ou utilização de equipamentos que permitam a medição das árvores sem a sua derrubada, para estimar o seu volume (Cardoso e Ribaski, 2015). Dentre os instrumentos utilizados para medição de árvores em pé, Cardoso e Ribaski (2015) destacam o dendrômetro a laser "Criterion RD 1000", capaz de medir diâmetros em várias alturas do tronco, sem a necessidade de abate da árvore.

Outro método eficaz é a utilização de equações volumétricas, que são uma alternativa devido à facilidade e redução de custos (Silva, 2020). Entre os diversos modelos disponíveis para estimar o volume em função do D e da altura total (H), o modelo de Schumacher e Hall (1933) tem grande destaque na área florestal e é um dos modelos mais utilizados, devido a suas estimativas não apresentarem tendência na maioria das vezes, decorrente das suas propriedades estatísticas (Campos e Leite, 2017).

2.4 Biomassa e Carbono Florestal

O conceito de biomassa refere-se à quantidade em peso de matéria orgânica, morta ou viva, existente nos organismos (animais ou vegetais) de uma determinada comunidade, tanto acima quanto abaixo do solo. A mensuração da biomassa florestal, seja em florestas plantadas ou naturais, implica na quantificação de quatro reservatórios de carbono: biomassa acima do solo, biomassa abaixo do solo (raízes), serapilheira e necromassa (Birdsey, 2006).

Em florestas, a biomassa acima do solo inclui o fuste, galhos, tocos, copa, sementes e folhagens. A biomassa abaixo do solo é composta pelas raízes vivas. A serapilheira contém toda a biomassa morta acima do solo, e a necromassa engloba a biomassa lenhosa morta caída no chão da floresta, que não faz parte da serapilheira. A biomassa total é a soma de todos esses componentes (Higa, *et al.*, 2014). A biomassa do fuste de uma árvore refere-se à quantidade total de matéria orgânica contida na parte do tronco acima do solo, excluindo galhos, folhas e raízes.

Vieira *et al.* (2008) propõem abordagens distintas para a mensuração da biomassa florestal. São chamados métodos diretos (determinação), os que envolvem medições físicas na biomassa, como a pesagem de troncos de árvores abatidas e secas. Já os métodos indiretos (estimativa), são baseados em correlações com variáveis de fácil obtenção, como dados de levantamentos florestais e a densidade básica da madeira, sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG), oferecendo alternativas para avaliar a biomassa aérea sem a necessidade de destruir o material vegetal.

A quantificação da biomassa em florestas é de extrema importância, já que a partir desses dados é possível calcular a quantidade de carbono armazenado na floresta, uma vez que o carbono pode ser estimado como uma função que depende da quantidade de biomassa presente no estoque florestal (Silva, 2020). A quantidade de biomassa varia consideravelmente entre os diversos tipos de ecossistemas, sendo essa variação influenciada por fatores ambientais como, por exemplo, mudanças de temperatura, além de ser impactada por distúrbios naturais ou antrópicos (Houghton, 2009).

Dessa maneira, obter estimativas com acurácia de biomassa pode garantir a consistência nas estimativas de armazenamento de carbono nos ecossistemas florestais (Sanquetta, 2002). Portanto, para uma compreensão e quantificação precisa do real potencial das florestas em capturar e armazenar carbono, é necessário obter informações sobre o teor de carbono das espécies arbóreas que compõem esses ecossistemas (Silva, 2020).

Para a obtenção do teor de carbono presente na biomassa florestal, é necessário levar em consideração que a madeira não é uma substância química uniforme ou

definida. Ela é formada por um agregado de componentes orgânicos e inorgânicos, e de acordo com Watzlawick *et al.* (2004), apresentando tanto para folhosas como para coníferas cerca de 50% de C, 6% de H e 44% de O, entre outros minerais em pequenas quantidades. Em IPCC (2006) é citado um teor médio de carbono para espécies florestais de 47%.

Em geral, há duas diferentes maneiras de se mensurar as perdas ou o acúmulo de carbono em uma região (Lindner e Karjalainen, 2007): mensurando as mudanças no estoque e mensurando o fluxo de entrada e de saída. A metodologia padrão utilizada para realizar essas mensurações baseia-se em dados de inventário florestal.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo está situada nas coordenadas 20° 50' 27" Sul e 41° 22' 22" Oeste, com altitude de 120 a 900 m, localizada no município de Jerônimo Monteiro, estado do Espírito Santo (Figura 1). De acordo com a classificação de Koppen, o clima da região é do tipo Aw, caracterizado por apresentar clima tropical chuvoso, com estação seca no inverno. A temperatura média anual do município é de 24,6 °C e precipitação média anual de 1.732,8 mm (Guimarães, Caiado e Silva, 2020). O solo da região é caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (Silva *et al.*, 2021).

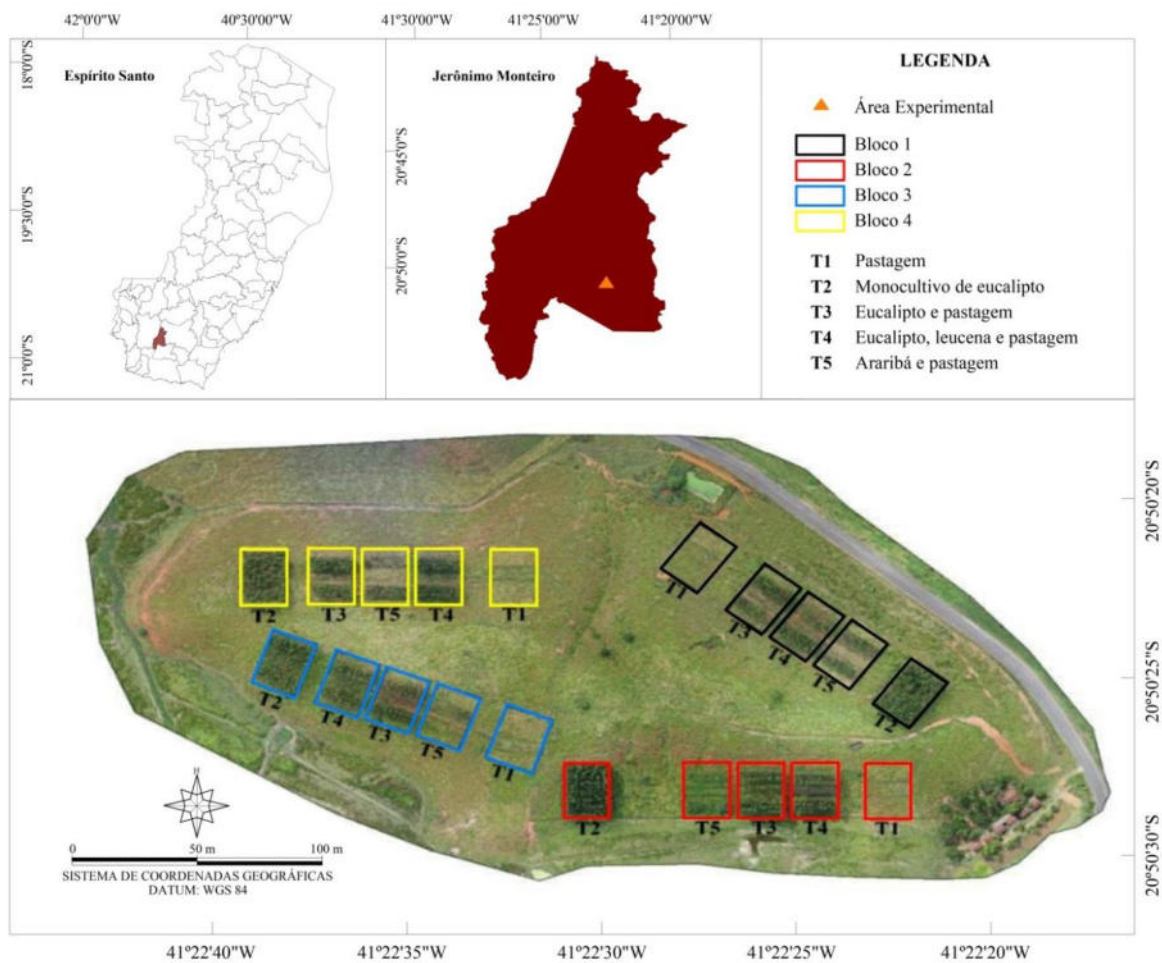


Figura 1 – Localização da área de estudo

Fonte: adaptado de Silva *et al.* (2021).

A área é composta por diferentes modelos de sistemas silvipastoris, conduzidos sob o delineamento em blocos casualizados (Tabela 1). Os modelos de sistemas na área são: 1) Monocultivo de capim marandu (*Urochloa brizantha* cv. Marandu); 2) Monocultivo de eucalipto (híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*); 3) Sistema silvipastoril com capim marandu e eucalipto; 4) Sistema silvipastoril com capim marandu, eucalipto e leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit); 5) Sistema silvipastoril com capim marandu e araribá (*Centrolobium tomentosum* Guillemim ex. Benth). Os tratamentos foram implantados em dezembro de 2017.

Tabela 1 – Descrição dos blocos implantados de diferentes tipos de sistemas silvipastoris

Bloco	Encosta	Orientação	Inclinação (°)
I	Nordeste	345	16,0
II	Sul	180	22,0
III	Sudoeste	208	22,0
IV	Norte	45	17,5

Fonte: Firmino (2020).

As mudas de eucalipto e araribá foram plantadas em dois grupos de três fileiras, sob espaçamento de 3,0 x 2,0 m, onde foram distanciados por uma faixa de 17,0 m entre si coberta por capim marandu, totalizando 653 árvores/ha. Já as mudas de leucena foram implantadas na faixa de 17,0 m de pasto, em grupos com 2 fileiras com espaçamento de 1,0 x 0,75 m, distanciadas a cada 3,0 m de capim marandu, totalizando 4.444 árvores/ha. Cada parcela possui área de 1.750,0 m² (50,0 x 35,0 m), para cada tratamento.

3.2 Coleta de dados

3.2.1. Inventário florestal

Embora haja quatro blocos implantados na área, com diferentes orientações de encosta, esta pesquisa foi conduzida somente nos blocos II (Sul) e III (Sudoeste), pois os demais blocos foram severamente infestados por formigas cortadeiras, o que teria impacto negativo nos resultados finais do estudo. As espécies analisadas foram o

eucalipto dos tratamentos 2, 3 e 4 e o araribá presente apenas no tratamento 5, ambos aos 60 meses de idade.

Foi realizado um inventário florestal do tipo censo, onde foram medidas todas as árvores presentes nos blocos selecionados, e neste levantamento foram coletadas as seguintes informações: número de árvores, diâmetro a 1,3 m do solo (D) e altura total (H) para as duas espécies. O D das árvores foi medido com auxílio da fita diamétrica. A H das árvores foi medida com régua telescópica de 15,0 m de altura (Figura 2), e para as árvores com alturas maiores que 15,0 m, utilizou-se o clinômetro Suunto.



Figura 2 – Coleta de altura (H) de araribá com auxílio da régua telescópica

Fonte: A autora (2023).

A área basal das árvores (g_i) foi obtida por meio da Equação 1:

$$g_i = \frac{D_i^2 \pi}{40000} \quad (1)$$

Em que:

g_i = área basal da i -ésima árvore (m^2);

D_i = diâmetro a 1,3 m do solo da i -ésima árvore (cm).

3.2.2. Cubagem rigorosa

O volume das árvores foi obtido por meio de cubagem rigorosa de 30 árvores de eucalipto e 30 de araribá. Para seleção das árvores-amostra de cada espécie, foi obtida a distribuição diamétrica. A amplitude das classes diamétrica de eucalipto foi de 4,0 cm, totalizando seis classes de diâmetro. Foram selecionados cinco indivíduos por classe. Já para o araribá, a amplitude foi de 3,0 cm com cinco classes de diâmetro, onde foram selecionados seis indivíduos por classe.

As árvores selecionadas foram cubadas por meio do método não destrutivo, onde o volume foi obtido com a árvore em pé, sendo utilizado o dendrômetro Criterion RD 1000 para realizar a medição, apoiado sobre um tripé (Figura 3). Foram medidos os diâmetros dos fustes das árvores em pé, com casca, nas alturas 0,10 m; 0,4 m; 1,0 m; 1,3 e 1,8 m e após esta altura de metro em metro até alcançar um diâmetro mínimo determinado pela H de cada árvore. O volume das seções foi obtido pelo método de Huber (Equação 2).

$$v_j = a_{1/2}l \quad (2)$$

Em que:

v_j = volume do j -ésimo torete, com casca, da seção (m^3);

$a_{1/2}$ = área seccional, com casca, na metade do comprimento da seção (m^2);

l = comprimento da seção (m).

Posteriormente, foi estimado o volume (v_i) das árvores cubadas e o fator de forma (f) por espécie, que foi obtido pela razão entre volume real observado e pelo volume do cilindro das árvores cubadas.



Figura 3 – Coleta dos diâmetros dos fustes das árvores em pé com uso do dendrômetro Criterion RD 1000

Fonte: A autora (2023).

3.3 Modelos volumétricos avaliados

De posse dos dados provenientes do processo de cubagem das árvores, foram ajustados dois modelos volumétricos que normalmente são utilizados em estudos para estimação do volume individual em florestas plantadas. Foram avaliados os modelos de regressão não linear de Schumacher e Hall (1993), e o modelo de regressão linear proposto por Spurr (1952), de acordo com a Equação 3 e 4, respectivamente.

$$v_i = \beta_0 D_i^{\beta_1} H_i^{\beta_2} \varepsilon_i \quad (3)$$

$$v_i = \beta_0 + \beta_1 D_i^2 H_i + \varepsilon_i \quad (4)$$

Em que:

v_i = volume total da i -ésima árvore (m);

D_i = diâmetro a 1,3m do solo da i -ésima árvore (cm);

H_i = altura total da i -ésima árvore (m);

β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros a serem estimados;

ε_i = erro aleatório.

O modelo linear foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados por meio da função *lm* e o não linear pelo método de Gauss Newton por meio da função *nls* do software R (R CORE TEAM, 2022).

3.4 Avaliação dos modelos de regressão

Os modelos de volume foram analisados por meio das seguintes estatísticas de desempenho: coeficiente de determinação ajustado [$R^2aj(\%)$], representado pela Equação 5, e também analisados pela raiz do quadrado médio do erro [$RMSE(\%)$], de acordo com a Equação 6.

$$[R^2aj(\%)] = \left\{ 1 - \left[\left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \right) \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \right] \right\} 100 \quad (5)$$

$$RMSE(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n} \frac{100}{\bar{Y}}} \quad (6)$$

Em que:

Y_i = valor observado da i -ésima variável dependente;

\hat{Y}_i = valor estimado da i -ésima variável dependente;

\bar{Y}_i = valor médio da variável dependente;

n = número de observações;

p = número de parâmetros do modelo.

A partir dos resultados encontrados, foram plotados os gráficos dos resíduos em relação aos valores estimados da variável analisada e os gráficos dos valores observados *versus* valores estimados da variável analisada.

3.5 Produção das espécies florestais analisadas

A área basal das espécies (G), por tratamento e face de exposição (bloco), foi obtida a partir da soma das áreas basais (g_i) das árvores por espécie selecionada. A partir dos dados do censo (D e H), o volume das árvores (v_i) foi obtido com a

aplicação do modelo volumétrico selecionado. Assim, foi realizada a caracterização dendrométrica das espécies (D , H , volume médios, mínimos e máximos) e calculado o incremento médio anual em volume por tratamento. O fator de forma das espécies foi calculado a partir do volume da árvore em m^3 , determinado pela cubagem rigorosa, e o volume do cilindro definido pelo D e pela H das árvores cubadas.

A quantificação de biomassa e carbono foi realizada por método indireto considerando valores de referência encontrados na literatura para a variável densidade média da madeira. De acordo com São Teago (2012), a densidade básica média no sentido base-topo do fuste de um plantio puro de *E. grandis* x *E. urophylla* é de $0,53 \text{ g.cm}^{-3}$. O estudo apresentado por Barbosa (2013) mostrou o mesmo valor médio de densidade para o Clone A da espécie *E. grandis* x *E. urophylla*, na cidade de Belo Oriente, MG. Para a espécie de araribá foi considerado o valor de $0,75 \text{ g.cm}^{-3}$ para densidade, conforme descrito por Lorenzi (2016), considerada uma madeira moderadamente densa. Campos (2015) encontrou um valor médio para densidade entre $0,67$ e $0,80 \text{ g.cm}^{-3}$ para a mesma espécie.

A biomassa do fuste de cada árvore foi obtida conforme Equação 7 (Amaro, 2010; Schumacher *et al.*, 2011):

$$w_f = v_i \rho \quad (7)$$

Em que:

w_f = biomassa do fuste (Mg);

v_i = volume do fuste da i -ésima árvore (m^3);

ρ = densidade básica da madeira (kg m^{-3}).

Para o teor de carbono das espécies foi considerado o valor recomendado pelo IPCC (2006), utilizando um teor igual a 47% para a conversão da biomassa em carbono. O carbono estocado no fuste de cada árvore foi obtida por meio da Equação 8 (Boina, 2008; Amaro, 2010):

$$c_f = w_f tCm \quad (8)$$

Em que:

c_f = carbono presente no fuste (Mg);

tCm = teor de carbono na madeira (kg Mg^{-1}).

O volume do fuste total (V_f), a biomassa do fuste total (W_f) e carbono do fuste (C_f) por tratamento e face de exposição (bloco), foram obtidos a partir da soma dos volumes (v_i), biomassas (w_f) e carbono do fuste (c_f) das árvores por espécie selecionada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da acurácia dos modelos volumétricos

Dentre os modelos analisados, todos apresentaram parâmetros significativos ($p < 0,05$) (Tabela 2). O modelo de Schumacher e Hall apresentou resultados mais acurados que o modelo de Spurr, apresentando valores de R^2_{aj} superiores para as espécies araribá e eucalipto. Quanto mais próximo de 100%, o modelo se ajusta melhor aos dados, significando que uma maior proporção de variação total é explicada pelas variáveis independentes no modelo (D e H).

O modelo de Schumacher e Hall apresentou valores de RMSE% inferiores para ambas as espécies, sendo que quanto menor o RMSE%, melhor é o desempenho do modelo, demonstrando que os valores estimados estão mais próximos dos valores observados. Azevedo *et al.* (2011) encontraram melhor desempenho no modelo de Schumacher e Hall, com um coeficiente de determinação ajustado igual a 95,64%, verificando que esse modelo foi o mais indicado para estimar o volume com casca e sem casca de *Eucalyptus* sp.

Tabela 2 – Coeficientes e estatísticas de desempenho dos modelos volumétricos para araribá e eucalipto

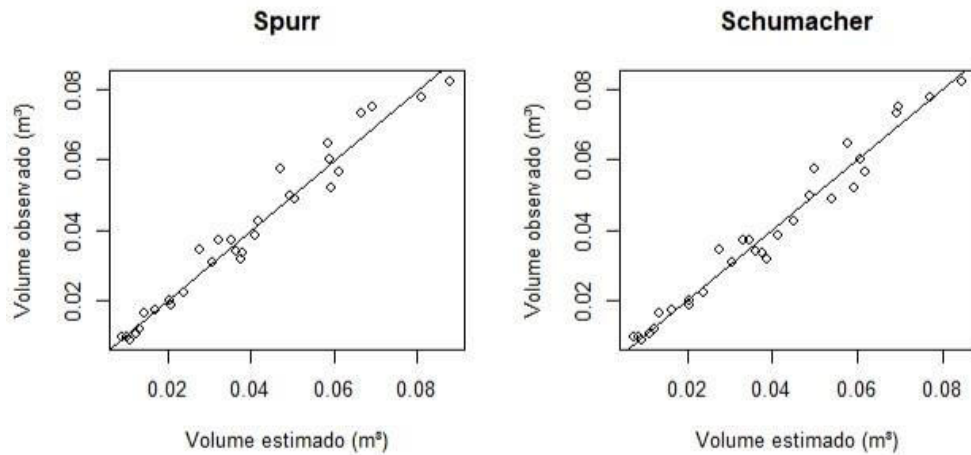
Modelo	Coeficientes			R^2_{aj} (%)	RMSE (%)
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$		
araribá					
Spurr	0,00395946*	0,00004105*	-	96,37	10,61
Schumacher e Hall	0,00010052*	1,89426007*	0,7469966*	96,83	9,92
eucalipto					
Spurr	0,01444891*	0,00002917*	-	97,86	11,17
Schumacher e Hall	0,00004384*	1,55866000*	1,2981600*	98,59	9,05

Nota: * Significativo a 5% pelo teste t student.

Fonte: Produção da própria autora.

É possível observar na Figura 4 que os modelos não apresentaram tendência nas estimativas e que a distribuição foi semelhante para os dois modelos analisados para araribá e eucalipto.

A)



B)

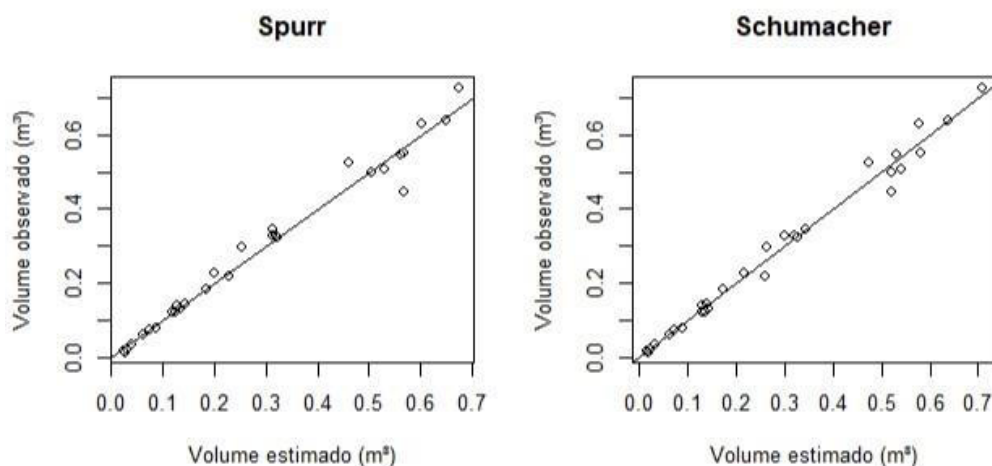
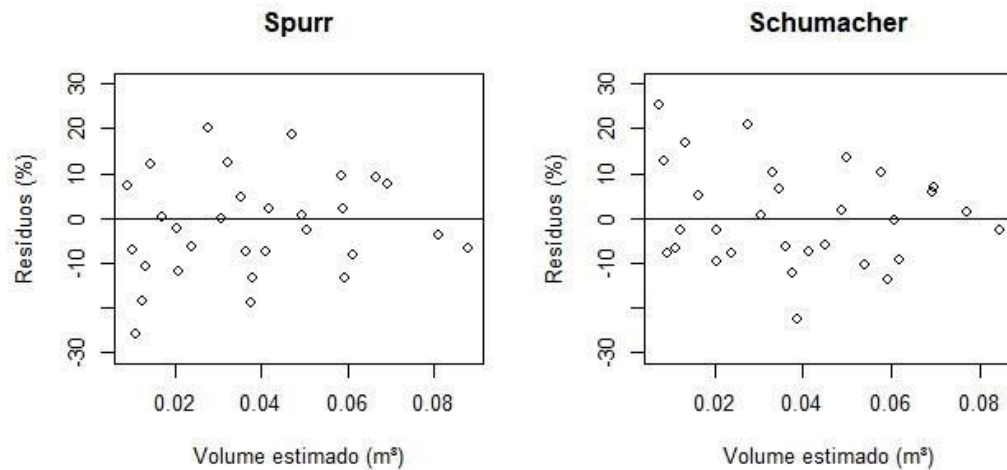


Figura 4 – Volumes observados versus volumes estimados em m^3 para os modelos de Schumacher e Hall e Spurr para as espécies de Araribá (A) e Eucalipto (B).

Fonte: A autora (2023).

Para verificar se os modelos foram de fato adequados, foi realizada a análise gráfica dos resíduos em relação ao volume estimado para os modelos de Schumacher e Hall e Spurr (Figura 5). Os dois modelos apresentaram comportamento semelhante na análise gráfica, porém, há uma tendência de subestimação para a espécie eucalipto no modelo de Spurr para pequenas árvores ($v < 0,2 m^3$). O modelo de Schumacher e Hall para ambas as espécies, demonstrou uma diferença menor na dispersão dos valores para estimativa de volume.

A)



B)

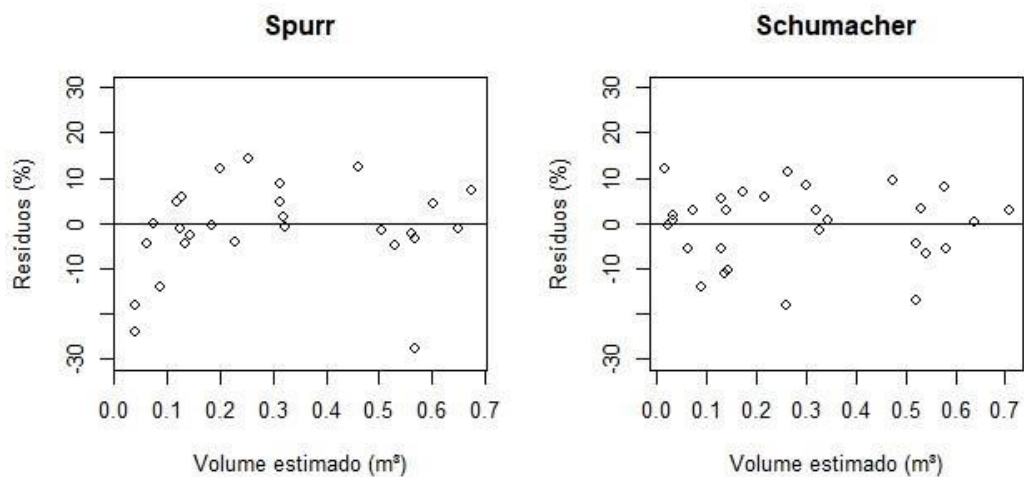


Figura 5 – Resíduos *versus* volumes estimados em m^3 para os modelos de Schumacher e Hall e Spurr para as espécies de Araribá (A) e Eucalipto (B).

Fonte: A autora (2023).

A partir dos resultados obtidos no R^2_{aj} , $RMSE\%$ e na análise gráfica, o modelo selecionado para estimativa volumétrica foi o de Schumacher e Hall.

4.2 Caracterização dendrométrica das espécies dos sistemas silvipastoris analisados

Os dados dendrométricos encontrados neste estudo (Tabela 3), quando o sistema tinha 60 meses, apresentam melhores médias em D , H e volume (v) por indivíduo nos sistemas compostos de eucalipto e pastagem (T_3) nos dois blocos avaliados.

Tabela 3 – Caracterização dendrométrica dos diferentes sistemas silvipastoris em Jerônimo Monteiro, ES

Bloco Sul (II)									
Tratamento	D (cm)			H (m)			v (m³)		
	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.
T2	25,95	14,11	6,20	35,25	18,90	8,70	0,5617	0,1484	0,0125
T3	25,90	16,92	5,60	33,48	19,98	6,51	0,6117	0,2101	0,0073
T4	25,30	16,08	6,90	28,11	19,55	7,73	0,4131	0,1757	0,0165
T5	14,00	8,59	3,20	10,54	6,86	2,48	0,0780	0,0280	0,0018

Bloco Sudoeste (III)									
Tratamento	D (cm)			H (m)			v (m³)		
	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.	Máx.	Méd.	Mín.
T2	26,60	13,60	5,00	29,00	18,09	5,87	0,5501	0,1418	0,0057
T3	26,60	16,53	6,50	33,46	20,79	7,42	0,6907	0,2098	0,0137
T4	24,70	15,38	7,20	33,46	20,70	9,12	0,5095	0,1777	0,0168
T5	12,80	7,56	3,20	9,98	5,62	2,64	0,0586	0,0199	0,0020

Em que: D = diâmetro a altura do peito (1,30 m) em centímetros (cm); H = altura em metros (m); v = volume em metros cúbicos (m³); Máx. = valor máximo; Méd. = valor médio; e Mín. = valor mínimo.

Fonte: Produção da própria autora.

No estudo realizado por Silva *et al.* (2021) na mesma área, foram realizadas medições quando o sistema silvipastoril tinha 40 meses de idade, a época, o monocultivo (T₂) proporcionou as melhores médias de D e H de árvores de eucalipto. Aos 40 meses, ambos os tratamentos tinham espaço para crescimento das árvores, porém, fatores como efeito de borda, radiação solar, disponibilidade de nutrientes e espaçamento (Ribeiro *et al.*, 2017), podem ter influenciado para que o monocultivo (T₂) tivesse maiores médias de D e H . Já aos 60 meses, o monocultivo apresentou maior competição devido a quantidade de árvores por hectare, onde a competição por luz, água e nutrientes são maiores do que no T₃, tratamento com menor densidade por unidade de área.

Como esperado, por se tratar de uma espécie nativa, as árvores de araribá (T₅) tiveram valores médios de D , H e v inferiores aos de eucalipto, sendo a maior diferença para média de H , independente do bloco de plantio. O estudo de Silva *et al.*

(2021) mostrou que para a espécie araribá (T₅), o bloco Sudoeste tinha melhor média de *D*, e o bloco sul a melhor média de *H*, e neste estudo o bloco Sul mostra melhores resultados médios em *D* e *H*, e conseqüentemente melhor média em *v*. Esse fato pode ter ocorrido devido ao ataque de formigas cortadeiras que influenciou nas menores médias no bloco Sudoeste.

Para o eucalipto, foi encontrado um fator de forma médio de 0,4146, retratando uma maior conicidade. Carvalho e Nahuz (2001) obtiveram como resultado um fator de forma de 0,435 para a mesma espécie. Um resultado próximo foi encontrado no estudo realizado por Trevisan (2006), onde o fator de forma encontrado foi de 0,42 para a espécie *Eucalyptus grandis*. Barros (2019) encontrou para clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, aos 61 meses, fator de forma de 0,47, porém, se tratavam de clones melhorados para uso como carvão, ou seja, necessitam de ter uma maior densidade para obterem um carvão de melhor qualidade.

Para a espécie do araribá foi encontrado um fator de forma médio igual a 0,6231, apresentando uma relação mais próxima da forma cilíndrica do que o eucalipto, que apresentou maior conicidade. A diferença observada quanto ao fator de forma determinado pelos autores descritos, são explicados pelo fato de o fator de forma ser influenciado pela espécie, sítio, espaçamento, desbaste e idade (Ferreira, 1999).

4.3 Produção do sistema silvipastoril

Ao analisar os resultados de volume de eucalipto e araribá em diferentes sistemas silvipastoris (Tabela 4), nota-se que como esperado, uma vez que há uma maior densidade de indivíduos, a produção em volume de eucalipto foi maior no sistema de monocultivo (T₂) e que o araribá tem produção significativamente menor que o eucalipto independente do bloco. É importante destacar que o araribá não tem programas de melhoramento florestal como já foi realizado para o gênero *Eucalyptus*. Percebe-se que o sistema silvipastoril de eucalipto com adição de leucena (T₄) apresentou maior produção média em relação ao sistema com eucalipto e pastagem (T₃) no Bloco Sudoeste (III) e resultado contrário no Bloco Sul (II).

Tabela 4 – Produção florestal dos diferentes sistemas silvipastoris em Jerônimo Monteiro, ES

Tratamento	Bloco Sul (II)				Bloco Sudoeste (III)			
	$N\ ha^{-1}$	G (m^2ha^{-1})	V (m^3ha^{-1})	IMA_v ($m^3ha^{-1}ano^{-1}$)	$N\ ha^{-1}$	G (m^2ha^{-1})	V (m^3ha^{-1})	IMA_v ($m^3ha^{-1}ano^{-1}$)
2	1400,0	23,96	210,21	42,04	891,4	14,85	126,45	25,29
3	508,6	12,42	106,84	21,37	382,9	8,96	80,34	16,07
4	508,6	10,99	89,37	17,87	468,6	9,32	83,25	16,65
5	428,6	1,73	12,47	2,49	325,7	0,87	6,49	1,30

Em que: $N\ ha^{-1}$ = número de indivíduos por hectare; G (m^2ha^{-1}) = área basal em m^2 por hectare; V (m^3ha^{-1}) = volume em m^3 por hectare; IMA_v ($m^3ha^{-1}ano^{-1}$) = incremento médio anual de volume por hectare.

Fonte: Produção da própria autora.

De maneira geral, a produção florestal foi maior no Bloco Sul do que no Bloco Sudoeste. Isso pode ter ocorrido devido a uma alta mortalidade de indivíduos (ver colunas $N\ ha^{-1}$) no Bloco Sudoeste em relação ao Bloco Sul, ocasionada por um ataque de formigas cortadeiras que pode ter afetado a produção florestal neste bloco. No estudo realizado por Zanetti *et al.* (2000), que investigou os efeitos da densidade e do tamanho dos formigueiros de saueiros na produção de madeira de eucalipto, foi constatado que a densidade variável dos formigueiros exerceu um impacto significativo negativo no volume de madeira. Isso sugere que o desfolhamento causado pelas formigas cortadeiras desempenhou um papel significativo na redução da produção de madeira, conseqüentemente, menor biomassa florestal.

Essa perda de madeira, relacionada tanto à densidade quanto ao tamanho dos formigueiros, podem estar correlacionadas com a sazonalidade, e neste estudo a diferença na produção também pode ser influenciada pela face de exposição dos blocos de acordo com o microclima. Firmino (2020) concluiu que as diferentes faces de exposição da encosta influenciaram a incidência de radiação solar, provocando diferenças em vertentes com orientações opostas, notoriamente durante o período de aumento da declinação solar, evidenciando o efeito da sazonalidade.

No estudo realizado por Silva *et al.* (2021), foi estimado o volume do plantio aos 7 anos de idade, sendo utilizada a equação de Ormerod (1973) ajustada por Barros (2019). Dentre os resultados encontrados, pode-se citar que a produção média

estimada aos 7 anos para os tratamentos (T₃) e (T₄) do bloco Sul foi menor quando comparada a este trabalho, o que significa que houve uma produção além do esperado para 5 anos de plantio nestes tratamentos mencionados. Já os outros tratamentos obtiveram uma produção menor do que o estimado aos 7 anos. No trabalho de Silva *et al.* (2021), o sistema silvipastoril de eucalipto com adição de leucena (T₄) apresentou maior produção média em relação ao sistema com eucalipto e pastagem (T₃), e neste estudo isso aconteceu apenas no bloco Sudoeste.

Aos 40 meses, Silva *et al.* (2021) encontrou a produtividade média (IMA) de 41,67; 15,19 e 17,92 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para os tratamentos 2, 3 e 4, respectivamente, resultados estes melhores quando comparados as médias do IMA do bloco Sudoeste, já que esta houve perda por ataque de formigas. Já no bloco Sul, houve maior IMA nos tratamentos 2 e 3. Também foi relatado por Silva *et al.* (2021) que a face Sul apresentou as menores produções de eucalipto e que não foram medidas as estimativas de produção para o araribá, devido ao curto período de tempo que o experimento foi avaliado (aproximadamente quatro anos). Entretanto, neste presente trabalho, a face Sul obteve o melhor resultado de produção.

4.4 Estoque de biomassa e carbono

A produção de biomassa total por tratamento (Tabela 5) foi maior nos sistemas de monocultivo de eucalipto (T₂), independente do bloco, assim como para o volume. Para todos os tratamentos, maior quantidade de biomassa foi encontrada no Bloco Sul, já que o Bloco Sudeste sofreu influência do ataque de formigas cortadeiras. No tratamento 4, em ambos os blocos, houve um valor próximo para quantidade de biomassa, independente da influência das formigas. Isso pode ser explicado devido ao efeito de borda e exposição ao sol em que os blocos estão expostos.

Para o tratamento 5, composto por araribá, foi observado um valor bem abaixo quando comparado aos tratamentos com eucalipto, isso se deve ao crescimento mais lento do araribá, por ser uma espécie nativa, quando comparado ao eucalipto, que é uma espécie geneticamente melhorada, como já relatado anteriormente.

Foi calculado o incremento médio anual de carbono estocado no fuste, e como consequente das outras variáveis analisadas, o Bloco Sul obteve o maior incremento

para todos os tratamentos avaliados, sendo o monocultivo de eucalipto (T₂) com o maior incremento anual.

Em estudo feito por Carvalho *et al.* (2015), foi encontrada uma biomassa acumulada no fuste de eucalipto estimada de 51,67 Mg ha⁻¹, sendo a madeira o compartimento da biomassa com maior quantidade de nutrientes, seguido pelas folhas, raízes, galhos e cascas. Tonini *et al.* (2019), encontrou um pequeno aumento no percentual de biomassa do tronco e casca no monocultivo de eucalipto quando comparado ao sistema silvipastoril, sendo de 51,3% e 48,2% respectivamente.

O resultado do estoque de carbono (Tabela 5) revelou-se positivo em ambos os blocos avaliados, destacando-se que os tratamentos compostos por eucalipto registraram uma maior fixação de carbono em comparação com o araribá. No estudo de Silva *et al.* (2021), o balanço de carbono foi positivo nos sistemas silvipastoris e no plantio de eucalipto em monocultivo. É relevante ressaltar que, neste estudo, não foram analisados os níveis de estocagem de carbono na pastagem e na leucena, deste modo, os sistemas integrados podem alcançar um estoque ainda maior.

Tabela 5 – Biomassa e carbono em diferentes sistemas silvipastoris em Jerônimo Monteiro, ES

Tratamento	Bloco Sul (II)			Bloco Sudoeste (III)		
	W_f (Mg ha ⁻¹)	C_f (Mg ha ⁻¹)	IMA_{C_f} (Mg ha ⁻¹)	W_f (Mg ha ⁻¹)	C_f (Mg ha ⁻¹)	IMA_{C_f} (Mg ha ⁻¹)
2	103,00	48,41	9,68	61,96	29,12	5,82
3	52,35	24,60	4,92	39,36	18,50	3,70
4	43,79	20,58	4,12	40,79	19,17	3,83
5	6,11	2,87	0,57	3,18	1,50	0,30

Em que: W_f = biomassa presente no fuste (Mg ha⁻¹); C_f = carbono estocado no fuste (Mg ha⁻¹); IMA_{C_f} = incremento médio anual de carbono estocado no fuste (Mg ha⁻¹).

Fonte: Produção da própria autora.

O híbrido *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* mostrou bom desenvolvimento nos tratamentos avaliados, apresentando grande potencial de estoque de biomassa nos sistemas silvipastoris avaliados. A principal fonte emissora de gases de efeito estufa, nos sistemas silvipastoris, é referente ao componente animal,

principalmente devido à fermentação entérica dos bovinos (Torres *et al.*, 2017). Deste modo, a inserção do componente arbóreo é de extrema importância para o balanço de carbono desses sistemas.

Além de sua capacidade de fixação de carbono, os SSP's têm o potencial de melhorar os atributos químicos e físicos do solo, como demonstrado no estudo de Loss *et al.* (2014), que analisou um sistema silvipastoril com eucalipto em Santa Tereza, Espírito Santo. Os sistemas silvipastoris com eucalipto, além de ter uma viabilidade econômica positiva, possuem um diferencial de mercado por ser um sistema neutro em carbono e que contribui com as questões ambientais brasileiras (Silva *et al.*, 2021).

5 CONCLUSÕES

Para a estimação do volume total de árvores de araribá e eucalipto, o modelo de Schumacher e Hall apresentou maior acurácia. Houve uma mortalidade acentuada de árvores na encosta Sudoeste devido à infestação por formigas cortadeiras, o que afetou significativamente a produção tanto de eucalipto, como a de araribá. A quantidade de volume, biomassa e carbono estocado do fuste foram maiores na encosta Sul. A produção encontrada evidencia a potencialidade de implantação desse tipo de sistema, especialmente para os pequenos produtores rurais, no sentido de escolher sistemas de produção economicamente mais viáveis e menos arriscados, impactando de forma positiva a economia capixaba. As análises do estoque de biomassa e carbono comprovam que os sistemas silvipastoris podem ser utilizados como forma de mitigar as mudanças climáticas, por meio da fixação de carbono no fuste das árvores.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARO, M. A. **Quantificação do estoque volumétrico, de biomassa e de carbono em uma Floresta Estacional Semidecidual no município de Viçosa-MG.** 2010. 168 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

ASSAD, E. D. *et al.* **Potencial de mitigação da emissão de gases de efeito estufa por meio da adoção da estratégia de integração lavoura-pecuária-floresta.** In: CORDEIRO, L. A. M. *et al.* (Ed.). *Integração lavoura-pecuária-floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde.* 1ed. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

AZEVEDO, G. B. *et al.* Estimativas volumétricas em povoamentos de eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira.** v. 31, n. 68, p. 309-318, 2011.

BARROS, S. S. **Forma do fuste e qualidade da madeira de eucalipto em diferentes espaçamentos e níveis de desbaste.** 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.

BASTOS, H. M. **Contribuição para o conhecimento dendrológico das espécies do gênero *Centrolobium*.** Arquivos do Serviço Florestal, Rio de Janeiro, v. 6, p. 125-186, 1952.

BATTISTI, Z. F. L. *et al.* Soil chemical attributes in a high biodiversity silvopastoral system. **Acta Agronomic.** n. 67, v. 4, 486-493 p. 2018.

BIRDSEY, R. A. Carbon accounting rules and guidelines for the United States Forest Sector. **Journal of Environmental Quality,** v. 35, p.1518-1524, 2006.

BOINA, A. **Quantificação de estoques de biomassa e de carbono em Floresta Estacional Semidecidual, Vale do Rio Doce, Minas Gerais.** 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

CAMPOS FILHO, E. M.; SARTORELLI, P. A. R. **Guia de árvores com valor econômico.** São Paulo: Agroicone, 2015.

CAMPOS, J. C. C.; Leite, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas.** Viçosa: UFV, 636 p. 2017.

CARDOSO, D. J.; RIBASKI, J. O uso do dendrômetro "Criterion" para quantificação do volume por método não destrutivo. **Embrapa Florestas**. Colombo, PR, 27 p. 2015.

CARLOS, S. M. *et al.* **Mercado voluntário de carbono: preservação ambiental com a intensificação da pecuária**. Observatório de Conhecimento e Inovação em Bioeconomia, Fundação Getúlio Vargas - FGV- EESP, São Paulo, SP, Brasil. 2022.

CARVALHO, A. M.; NAHUZ, M. A. R. The valuation of the *Eucalyptus grandis* x *urophylla* hybrid wood through the production of small dimension sawnwood, pulpwood and fuelwood. **Scientia Forestalis**. n. 59, p. 61-76. 2001.

CARVALHO, B. H. R. *et al.* **Sistema silvipastoril: produtividade aliada ao bem-estar animal**. MilkPoint. 05 dez. 2019. Disponível em: <<https://www.milkpoint.com.br/artigos/producao-de-leite/sistema-silvipastoril-produtividade-aliada-ao-bemestar-animal-217228/#>>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CARVALHO, M. M. *et al.* **Estabelecimento de sistemas silvipastoris: ênfase em áreas montanhosas e solos de baixa fertilidade**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2002. 12 p.

CARVALHO, M. M.; XAVIER, D. F. **Sistemas silvipastoris para recuperação e desenvolvimento de pastagens**. In: AQUINO, A. M.; Assis, R. L. de. Agroecologia: princípios e técnicas para uma agricultura orgânica sustentável. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2012.

CARVALHO, P. E. R. Espécies Arbóreas Brasileiras. *Centrolobium tomentosum*. **Embrapa Informação Tecnológica**. Colombo, PR, v.1, p.143-150. Embrapa Florestas, 2003.

CARVALHO, R. R. *et al.* Estoque de biomassa e de nutrientes em um povoamento do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* no Bioma Pampa – RS. **Ecologia e Nutrição Florestal**. Santa Maria - RS, v.3, n.3, p.71-81, 2015. DOI: 0.5902/2316980X18275. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/enflo/article/view/18275/pdf_1>. Acesso em: 12 out. 2023.

DELARMELINA, W. M. **Biomassa e carbono em plantios de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* sob diferentes espaçamentos em área de pastagem**.

2019. 96 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2019.

EFFGEN, E. M. *et al.* Avaliação dos atributos químicos do solo sob sistemas silvipastoris no sul do Espírito Santo. *In: Congresso Capixaba de Pesquisa Agropecuária. Anais do Congresso Capixaba de Pesquisa Agropecuária.* Vitória, ES, 2021.

FERREIRA, S, O. **Estudo da forma do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*.** 1999. 112p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras; 1999.

FIGUEIREDO, D. D. C. **Alterações microclimáticas no sistema silvipastoril com núcleos arbóreos:** uma abordagem local para uma mudança climática global. 2022. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas) – Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

FIRMINO, C. T. **Microclima de sistema silvipastoril em diferentes orientações de encostas.** 2020. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2020.

FRANCO, F. S. **Sistemas Agroflorestais: uma contribuição para a conservação dos recursos naturais na Zona da Mata de Minas Gerais.** 2000. 148 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GANDINI, E. M. M. **Desenvolvimento de eucalipto e capim-marandu em sistema silvipastoril.** 2018. 120 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2018.

GUIMARÃES, M. A. P.; Caiado, L. H. L.; Silva, G. S. **PROATER - Programa de assistência técnica e extensão rural de Jerônimo Monteiro - ES (2020–2023):** planejamento e programação de ações. INCAPER, 2020.

HIGA, R. C. V. *et al.* Protocolo de medição e estimativa de biomassa e carbono florestal. **Embrapa Florestas.** Colombo, PR. 2014.

HIGUCHI, N.; CARVALHO JÚNIOR, J. A. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. *In: Seminário emissão x sequestro de CO₂ – uma nova oportunidade de negócios para o Brasil.* Rio de Janeiro. **Anais do Seminário Emissão x Sequestro de CO₂.** Rio de Janeiro: CVRD, 1994. p. 125-145.

HOUGHTON, R.; HALL, F.; GOETZ, S. Importance of biomass in the global carbon cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, 2009.

IBÁ – Indústria Brasileira de Árvores. 2023. **Relatório anual Ibá**. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2023.

IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change. **About IPCC**. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/>> Acesso em: 20 out. 2023.

IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change. **Climate Change 2007: Synthesis Report**. Contribution of Working Group I, II, and III to the Fourth assessment report of the IPCC. Geneva, Switzerland, 104 p. 2007.

IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change. **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel On Climate Change. Cambridge, England. 2014.

IPCC – Intergovernmental Panel On Climate Change. **Guidelines for national greenhouse gas inventories prepared by the National GreenhouseG Inventories Programme**. EGGLESTON, H. S. *et al.* (Eds.). Published: IGES, 2006.

LIMA, G. C. P.; *et al.* Acuracidade de métodos de cubagem para estimativa do volume de *Pinus taeda* L. **BIOFIX Scientific Journal**, v.1, n.1, p.74-82, 2016.

LINDNER, M.; KARJALAINEN, T. Carbon inventory methods and carbon mitigation potentials of forests in Europe: a short review of recent progress. **Europe Journal Forest Research**. [S. l.], v. 126, p. 149-156, 2007.

LORENZI, H. **Árvores Brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. v. 1. Nova Odessa: Plantarum, 2016.

LOSS, A. *et al.* Physical and chemical attributes in systems of the consortium and succession of crops, pasture and silvopastoral in Santa Teresa, Espírito Santo State, Brazil. **Bioscience Journal**. Uberlândia, v. 30, n. 5, p. 1347-1357. 2014.

LUSTOSA, A. A. S. Sistema silvipastoril - propostas e desafios. **Revista Eletrônica LatoSensu**, v. 3, n. 1, p. 22, 2008.

MACEDO, R. L. G. **Princípios básicos para o manejo sustentável de sistemas agroflorestais**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2000.

NICOLETTI, M. F. **Comparação dos métodos não-destrutivos de cubagem de árvores em pé visando à determinação da biomassa**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Campinas, 2011.

OLIVEIRA, L. T. *et al.* Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, n. 9, p. 692-699. 2014.

PACIULLO *et al.* Oportunidades e desafios dos sistemas integrados na produção animal: ênfase nos sistemas silvipastoris. *In: Reunión de la Asociación Latinoamericana de Producción Animal*, v. 25 (1-2), p. 25-35. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal. Recife, PE. ALPA, 2017.

PEREIRA, J. S.; Rodrigues, S. C. Crescimento de espécies arbóreas utilizadas na recuperação de área degradada. **Caminhos de Geografia**: v. 13, n. 41, p. 102-110. 2012.

PEZZOPANE J. E. M. *et al.* Temperatura do solo no interior de um fragmento de floresta secundária semidecidual. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**: v.10, p.1-8. 2002.

RIBEIRO M. D. S. B. *et al.* Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p. 31-45, 2017.

R CORE TEAM. 2022. R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Jerônimo Monteiro. Disponível em: <<https://www.R-project.org>>. Acesso em: 10 abr. 2023.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, C. R. R. Metodologias para determinação de biomassa florestal. *In: Fixação de carbono: atualizações, projetos e pesquisas*. Curitiba. p. 77-94. 2004.

SANQUETTA, C. R. *et al.* Dynamics of area, volume, biomass, and carbon in the brazilian planted. **BIOFIX Scientific Journal**: v. 3, n. 1, p. 152-160. 2018.

SANQUETTA, C. R. *et al.* The role of forests in climate change. **Quebracho - Revista de Ciencias Forestales**, v. 19, n. 1-2, p. 84-96. 2011.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. *In*: Sanquetta, C. R. *et al.* (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: [s. n.], p. 119-140. 2002.

SANTOS, K. A. M. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e a proteção dos bens comuns ambientais: a disciplina jurídica dos créditos de carbono lida no contexto da Cúpula das Américas e da adesão ao ajuste estrutural do Estado**. 2016. 104 f. Dissertação (Mestrado em Direito) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.

SÃO TEAGO, G. B. **Qualidade das madeiras de acácia e eucalipto provenientes de cultivo misto visando a produção de celulose**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

SCHETTINI, B. R. L. *et al.* Sistemas silvipastoris com eucalipto: estocagem de carbono em diferentes espaçamentos e clones. **Ciência Florestal**, v. 31, n. 3, p. 1047-1062, 2021. DOI: 10.5902/1980509825281. Disponível em: <<https://doi.org/10.5902/1980509825281>>. Acesso em: 12 jun. 2023.

SCHROTH, G. *et al.* Contribution of agroforests to landscape carbon storage. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, v. 20, n. 7, p. 1175-1190, 2015.

SCHUMACHER, M. V.; WITSCHORECK, R.; CALIL, F. N. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* spp. de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 1, p. 17–22, 2011.

SILVA, A. A. *et al.* Estoques de carbono e nitrogênio no Sistema Silvipastoril de Alta Biodiversidade: nucleação aplicada possibilitando produção pecuária de baixo carbono. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 9, n. 10, e2799108589, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i10.8589. Disponível em: <<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/8589>>. Acesso em: 3 set. 2023.

SILVA, G. F. *et al.* **Avaliação econômica de diferentes modelos de sistemas silvipastoris**. *In*: GONÇALVES, F. G. *et al.* (Org.). **Sistemas Integrados de Produção: pesquisa e desenvolvimento de tecnologias**. 1ed. Guajará, SP: Científica digital, 2021, cap. 12, p. 217-252.

SILVA, L. D. C. da. **Mudança em volume, biomassa e carbono do fuste em uma Floresta Estacional Semidecidual da Mata Atlântica, ES.** 2020. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2020.

SILVA, V. P.; RIBASKI, J. Sistema silvipastoril: integração de competências para a competitividade do agronegócio brasileiro: **Opiniões**, p. 48-49, 2006.

SILVA, V. P. *et al.* Sistema Silvipastoril: Perguntas e respostas: **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**, Brasília, [2023]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/florestas/transferencia-de-tecnologia/sistema-silvipastoril/perguntas-e-respostas>>.

SMANIOTTO, J. *et al.* Quantificação de biomassa florestal de *Pinus elliottii* com seis anos de idade, em Augusto Pestana/RS. XXII Seminário de Iniciação Científica, **UNIJUÍ**. 2014. Disponível em: <<https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaoconhecimento/article/view/3952/3324>>. Acesso em: 30 nov. 2023.

SOUZA, C. L. *et al.* Balanço de Carbono do processo de produção de madeira de reflorestamento no Norte de Minas Gerais: **Agrarian Sciences Journal**, v. 11, p. 01-08, nov. 2019.

SOUZA, G. S. *et al.* **Sistemas silvipastoris e preparo do solo na renovação de pastagens degradadas no Espírito Santo.** In: GONÇALVES *et al.* (org.). Sistemas integrados de produção: Pesquisa e desenvolvimento de tecnologias. 1ed. Guarujá, SP: Científica Digital, 2021. cap. 13, p. 251-278.

VIEIRA, S. A. *et al.* Estimation of biomass and carbon stocks: The case of Atlantic Forest. **Biota Neotropica**. São Paulo, v. 8, n. 2, p. 21-29. 2008.

THE UNITED Nations Framework Convention on Climate Change (a). **What is the CDM.** Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/about/index.html>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

THE UNITED Nations Framework Convention on Climate Change (a). **What is the REDD+?.** Disponível em: <<https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/redd/what-is-redd>>. Acesso em: 05 nov. 2023.

TONINI, H. *et al.* Effect of planting system and solar exposure on biomass allocation in the initial growth of eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 1, p. 86-95, 2019. DOI: 10.5902/1980509817808. Disponível em: <<https://doi.org/10.5902/1980509817808>>. Acesso em: 28 set. 2023.

TORRES, C. M. M. E. *et al.* Greenhouse gas emissions and carbon sequestration by agroforestry systems in southeastern Brazil. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1–7, 1 dez. 2017.

TREVISAN, R. **Efeito da intensidade de desbaste nas características dendrométricas e tecnológicas da madeira de *Eucalyptus grandis* hill ex maiden**. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

WATZLAWICK, L. F. *et al.* Teores de carbono em espécies da Floresta Ombrófila Mista. Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas. *In*: Sanquetta, C. R. *et al.* (Eds.). **Fixação de carbono**: atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba: UFPR/Laboratório de Inventário Florestal, p. 95-109, 2004.

WENDLING *et al.* **Sistemas silvipastoris – Uma alternativa viável para áreas montanhosas do Espírito Santo**. *In*: GONÇALVES, F. G. *et al.* (org.). **Sistemas integrados de produção: Pesquisa e desenvolvimento de tecnologias**. 1ed. Guarujá, SP: Científica Digital, 2021. cap. 11, p. 109-127.

ZANETTI, R. *et al.* **Efeito de densidade e do tamanho de saueiros sobre a produção de madeira em eucaliptais**. *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, v.29, n.1, p.105-112, 2000.