

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ESTIMATIVA DE VOLUME E BIOMASSA FLORESTAL POR MÉTODO DE
CONVERSÃO E A PARTIR DE ÍNDICES ESPECTRAIS EM ÁREA DE
CAATINGA MANEJADA**

ALISSON GEAN CARVALHO GUIMARÃES

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
FEVEREIRO – 2025

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ESTIMATIVA DE VOLUME E BIOMASSA FLORESTAL POR MÉTODO DE
CONVERSÃO E A PARTIR DE ÍNDICES ESPECTRAIS EM ÁREA DE
CAATINGA MANEJADA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

ALISSON GEAN CARVALHO GUIMARÃES

Orientador: Prof. Dr. Alessandro de Paula (UESB)

VITÓRIA DA CONQUISTA
BAHIA – BRASIL
FEVEREIRO – 2025

G976e

Guimarães, Alisson Gean Carvalho.

Estimativa de volume e biomassa florestal por método de conversão e a partir de índices espectrais em área de caatinga manejada. / Alisson Gean Carvalho Guimarães, 2025.

68f. il.

Orientador (a): Dr. Alessandro de Paula.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Vitória da Conquista, 2025.

Inclui referências. 64 - 68.

1. Biomassa florestal. 2. Floresta Nacional de Contendas do Sincorá. 3. Floresta Seca. 4. Aprendizado de Máquina - Conversão de volume. 5. Google Earth Engine. I. Paula, Alessandro de.

II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. III. T.

CDD: 580

Catálogo na fonte: Juliana Teixeira de Assunção – CRB 5/1290

UESB – Campus Vitória da Conquista - BA


ALISSON GEAN CARVALHO GUIMARÃES

**ESTIMATIVA DE VOLUME E BIOMASSA FLORESTAL POR MÉTODO DE
CONVERSÃO E A PARTIR DE ÍNDICES ESPECTRAIS EM ÁREA DE
CAATINGA MANEJADA**


Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 03 de fevereiro de 2025.


Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FERNANDO SILVA MAGNAGO**
Data: 05/02/2025 14:54:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Luiz Fernando Silva Magnano (D.Sc., Biologia Vegetal) – UFSB

Documento assinado digitalmente
 **ODAIR LACERDA LEMOS**
Data: 12/02/2025 07:32:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Odair Lacerda Lemos (D.Sc., Agronomia) – UESB

Documento assinado digitalmente
 **ALESSANDRO DE PAULA**
Data: 04/02/2025 18:15:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Alessandro de Paula (D.Sc., Ecologia e Recursos Naturais) – UESB
Orientador

RESUMO

GUIMARÃES, Alisson Gean Carvalho, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, fevereiro de 2020. **Estimativa de volume e biomassa florestal por método de conversão e a partir de Índices Espectrais em área de Caatinga manejada.** Orientador: Alessandro de Paula.

Este trabalho teve como objetivo estimar o volume e a biomassa florestal por método de conversão e a partir de Índices Espectrais (IE) durante o período seco e chuvoso, em área de Caatinga manejada, após oito anos de recuperação, na Floresta Nacional de Contendas do Sincorá, Bahia. O experimento foi composto de 48 parcelas fixas de 20 m x 20 m, divididas igualmente em três unidades amostrais, que correspondem a três tipos de manejo e uma condição de Caatinga não manejada. Os dados foram obtidos por meio de inventário florestal em 2023. Durante o inventário foram identificados e mensurados todos os indivíduos arbóreos que apresentaram Diâmetro à Altura do Peito (DAP) igual ou superior a 5 cm com o auxílio de uma suta, e a altura (H). A estimativa da biomassa florestal foi feita a partir da conversão de volume, usando quociente de forma (0,81) validado para a área, e densidade básica das espécies segundo a literatura. Os Índices de Espectrais (IE) foram selecionados conforme a revisão de literatura (16), processados no Google Earth Engine (GEE), utilizando imagem de satélite e drone. Três modelos de regressão foram utilizados, sendo: o Modelo Linear Generalizado (GLM), o Modelo Aditivo Generalizado (GAM) e o Random Forest (RF). As análises estatísticas foram realizadas pelo programa Past 4.02 e R studio 4.4.2. A estimativa de biomassa pela conversão de volume e equação foi estatisticamente similar, entretanto recomenda-se a aplicação da conversão de volume na área avaliada pelo maior número de trabalhos desenvolvidos e por considerar a densidade básica de cada espécie. O RF apresentou os melhores resultados, evidenciando não haver diferença estatística na estimativa de volume e biomassa florestal entre os períodos (seco e chuvoso), entretanto os IE significativos para o período seco diferem daqueles do período chuvoso. A imagem de drone discriminou melhor a distribuição do volume e da biomassa florestal, devido a sua maior resolução espacial. Para a imagem de satélite, o ExR e o NDRE se destacaram na estimativa das variáveis para o período seco, ao passo que NIRG, GNDVI e CHI se sobressaíram durante o período chuvoso. Para a imagem de drone, o TGI e o ExR foram superiores na estimativa de volume e biomassa florestal no período seco. Para o período chuvoso, ExG e GLI promoveram os melhores resultados para o volume, enquanto o VARIG e o ExR se sobressaíram para a biomassa florestal. Considerando as lacunas e importância do tema acerca da estimativa de parâmetros florestais por métodos indiretos, recomenda-se a realização de outras pesquisas em ambientes de florestas secas, de modo específico em área de Caatinga, cujo comportamento da vegetação difere em decorrência das alterações climáticas.

Palavras-chave: Aprendizado de Máquina. Conversão de Volume. Floresta Seca. Floresta Nacional de Contendas do Sincorá. Google Earth Engine.

ABSTRACT

GUIMARÃES, Alisson Gean Carvalho, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, fevereiro de 2020. **Estimation of forest volume and biomass by conversion method and from Spectral Indices in a managed Caatinga area.** Adviser: Alessandro de Paula.

This work aimed to estimate the volume and forest biomass using the conversion method and from Spectral Indices (SI) during the dry and rainy period, in a managed Caatinga area, after eight years of recovery, in the National Forest of Contendas do Sincorá, Bahia. The experiment was composed of 48 fixed plots of 20 m x 20 m, divided equally into three sampling units, corresponding to three types of management and one unmanaged Caatinga condition. The data were obtained through a forest inventory in 2023. During the inventory, all arboreal individuals that had a Diameter at Breast Height (DBH) equal to or greater than 5 cm were identified and measured with the aid of a suta, and their height (H). The estimate of forest biomass was made from volume conversion, using shape quotient (0.81) validated for the area, and basic density of species according to the literature. The IE were selected according to the literature review (16), processed in Google Earth Engine (GEE), using satellite and drone images. Three regression models were used: the Generalized Linear Model (GLM), the Generalized Additive Model (GAM) and the Random Forest (RF). Statistical analyzes were performed using Past 4.02 and R studio 4.4.2. The biomass estimate by volume conversion and equation was statistically similar, however it is recommended to apply the volume conversion in the area evaluated by the largest number of works developed and by considering the basic density of each species. The RF presented the best results, showing that there was no statistical difference in the estimation of forest volume and biomass between the periods (dry and rainy), however the significant IE for the dry period differ from those of the rainy period. The drone image better discriminated the distribution of forest volume and biomass, due to its higher spatial resolution. For satellite images, ExR and NDRE stood out in estimating variables for the dry season, while NIRG, GNDVI, and CHI stood out during the rainy season. For drone images, TGI and ExR were superior in estimating forest volume and biomass in the dry season. For the rainy season, ExG and GLI provided the best results for volume, while VARIG and ExR stood out for forest biomass. Considering the gaps and importance of the topic regarding the estimation of forest parameters by indirect methods, it is recommended that further research be carried out in dry forest environments, specifically in the Caatinga area, where vegetation behavior differs as a result of climate change.

Keywords: Machine Learning. Volume Conversion. Dry Forest. Contendas do Sincorá National Forest. Google Earth Engine.

Dedico este trabalho a toda a minha família, em especial ao meu irmão, Renan Carlos Carvalho Guimarães, e aos meus pais, Antenor Vilela Guimarães e Regivania de Siqueira Carvalho Guimarães, que sempre defenderam que o conhecimento é o caminho para nos tornarmos seres humanos melhores.

Ele dá ânimo ao cansado e recupera as forças do enfraquecido. Até os jovens se fatigam e se cansam, e os moços também tropeçam e caem. Mas os que esperam no Senhor renovam suas forças, criam asas como águias, correm e não se fatigam, podem andar que não se cansam. (ISAÍAS 40:29-31)

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço a Deus, pois sem Ele nada em minha vida seria possível. Ele me deu forças para enfrentar e suportar cada obstáculo presente no caminho, acalmou meu coração diante das preocupações e me fez forte nos momentos mais vulneráveis. Obrigado, meu Deus.

Agradeço aos meus pais (Regivania de Siqueira Carvalho Guimarães e Antenor Vilela Guimarães), por serem exemplo de honestidade, humildade e caráter; por não medirem esforços para que eu pudesse estudar e ter as oportunidades que eles nunca tiveram. Por acreditarem no meu potencial e na educação como ferramenta transformadora de vidas.

Agradeço ao meu irmão, Renan Carlos Carvalho Guimarães, por acreditar em mim e me incentivar a continuar estudando e por ser presença física diária na vida dos nossos pais, enquanto estou ausente.

Agradeço ao meu presente de Deus, Izaura Silva Callou, por seu amor incondicional, cuidado, paciência, orações e cumplicidade. A cada desafio você segura minha mão e diz “estou ao seu lado, você não está sozinho, vamos juntos”, e isso me fortalece e me renova. Você me inspira pelo ser humano que é. Obrigado por ser tão maravilhosa e gentil. Eu te amo, minha princesa, vamos juntos, até o céu.

Agradeço aos meus tios e tias, Graciene, Rinaldo, Noeli e Antônio, por me ajudarem nesta caminhada de graduação e mestrado. Vocês me inspiram a ser alguém melhor e a não desistir diante das adversidades.

Agradeço aos meus primos, Rafael e sua esposa, Jéssica, Janily e Renata, por me incentivarem e não me deixarem desanimar diante das provações. Guardo cada conselho em meu coração.

Agradeço ao meu avô por acreditar que sou capaz de vencer os desafios que a vida impõe. Obrigado por sempre me colocar nas suas orações. Ao vê-lo rezando, percebo seu amor e temor a Deus: algo inspirador e contagiante.

Agradeço ao meu Padrinho de Crisma, Geraldo e sua esposa, Dalva, por me mandar mensagens todos os dias para saber como estou, aconselhar, perguntar se preciso de algo e por simplesmente se preocupar comigo. Obrigado por tudo e por tanto.

Agradeço aos amigos/irmãos que a vida me deu, Tibério, Aritano, Leonardo, Thayná, Josy, Ozivaldo e Renato, por torcerem e celebrarem cada conquista em minha

vida. Sei que posso contar com vocês. Saibam que vocês me inspiram pela simplicidade, honestidade e amor pelo que fazem.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais (em especial àqueles com os quais tive mais contato: Alessandro, Odair, Robson, Rita, Cristiano e Dalton) pela amizade e conhecimento repassado. Vocês foram fundamentais nessa jornada, aprendi muito. Meu muito obrigado a todos.

Agradeço, de modo muito especial, ao Professor e Orientador Alessandro de Paula por me acolher não só como orientando, mas na cidade, Vitória da Conquista, Bahia. Pela preocupação com o meu bem-estar, por estar longe da família e outras questões pessoais. Sempre que desanimei, o senhor me chamou para conversar e me ajudou. Obrigado por tudo e por tanto, Deus abençoe grandemente o senhor e a sua família.

Agradeço à Fabrícia Teixeira, secretária do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, por tamanha paciência e por realizar seu trabalho com tanto empenho. Obrigado pela solicitude, por esclarecer dúvidas recorrentes e nos fazer atentar aos prazos de que porventura esquecemos.

Agradeço aos membros do Laboratório de Ecologia e Proteção Florestal, Weslei, Beatriz, Joselane, Daiane, Danieli, Caique, Rose Clara, Thaís, Gustavo e Geovana, por me acolherem e ajudarem no desenvolvimento da minha pesquisa: sem vocês eu não teria conseguido.

Agradeço aos colegas de turma Igor, Lucas, Aline e Neide pela parceria e incentivo ao longo deste tempo. Torço muito pelo sucesso de vocês.

Agradeço à agrônoma mais floresteira da Uesb, Zilda Cristina, pela amizade, conselhos e torcida. Aprendi bastante com você durante este tempo. Sua humildade e paciência inspiram muita gente, inclusive a mim.

Agradeço à Brhenda, Maria Betânia e Eryca por me acolherem e me ajudarem a se adaptar em Conquista e por me incentivarem a continuar, apesar dos desafios.

Agradeço à Professora Ivonete Alves Bakke por me incentivar nos estudos e se preocupar com seus alunos, mesmo distante fisicamente.

Agradeço aos funcionários da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia pelo compromisso e responsabilidade no exercício do serviço. Em especial, aos motoristas pela contribuição de vocês na realização das minhas coletas.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico

e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto (processo nº 88887.824010/2023-00). Ao ICMBio do estado da Bahia pela permissão para desenvolver esta pesquisa na Floresta Nacional Contendas do Sincorá (FLONA) e a sua equipe por nos acolher na casa de apoio durante os dias em que necessitamos. A todos os envolvidos, meu muito obrigado.

Agradeço à instituição Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB) pela estrutura, acolhimento, facilitação no processo de aprendizagem dos discentes e preocupação com o bem-estar de todos que a compõem.

A todos vocês, meu muitíssimo obrigado!!!

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DA CAATINGA.....	17
2.2 ESTIMATIVA DA BIOMASSA FLORESTAL.....	20
2.3 MODELAGEM FLORESTAL NA CAATINGA.....	22
2.4 ÍNDICES ESPECTRAIS (IE).....	24
ARTIGO I: ANÁLISE DA ESTIMATIVA DE VOLUME E BIOMASSA FLORESTAL EM ÁREA DE CAATINGA MANEJADA, BAHIA.....	26
Resumo.....	27
Abstract.....	27
1. Introdução.....	27
2. Metodologia.....	28
2.1 Caracterização da área de estudo.....	28
2.2 Croqui experimental.....	29
2.3 Coleta dos dados e identificação das espécies.....	30
2.4 Espécies imunes ao corte no Estado da Bahia.....	30
2.5 Quantificação do volume florestal.....	30
2.6 Quantificação da biomassa florestal.....	31
2.7 Análise dos dados.....	31
3. Resultados e discussão.....	31
4. Considerações finais.....	36
Agradecimentos.....	36
Referências.....	36
ARTIGO II: ESTIMATIVA DE VOLUME E BIOMASSA FLORESTAL EM ÁREA DE CAATINGA MANEJADA A PARTIR DE ÍNDICES ESPECTRAIS.....	40
Resumo.....	41
Abstract.....	41
1. Introdução.....	41
2. Metodologia.....	42
2.1 Caracterização da área de estudo.....	42
2.2 Croqui experimental.....	44
2.3 Coleta dos dados e obtenção do volume e biomassa florestal.....	44
2.4 Aquisição e processamento das imagens.....	45
2.5 Índices Espectrais (IE).....	46
2.6 Ajuste dos Modelos Preditivos.....	47
2.6.1 Modelo Linear Generalizado (GLM).....	47
2.6.2 Modelo Aditivo Generalizado (GAM).....	47
2.6.3 Modelo Random Forest (RF).....	47
2.7 Avaliação e Seleção do Melhor Modelo.....	47
2.8 Geração de mapas de volume e biomassa florestal.....	48
3. Resultados.....	48
3.1 Período seco (imagem de satélite).....	48

3.2 Período chuvoso (imagem de satélite).....	50
3.3 Período seco (imagem de drone).....	52
3.4 Período chuvoso (imagem de drone).....	54
3.5 Espacialização para a FLONA (período seco e chuvoso).....	56
4. Discussão.....	57
4.1. Período seco e chuvoso (imagem de satélite).....	57
4.2. Período seco e chuvoso (imagem de drone).....	58
5. Considerações finais.....	58
Agradecimentos.....	59
Referências.....	59
3 CONCLUSÕES GERAIS.....	63
4 REFERÊNCIAS.....	64

1 INTRODUÇÃO

A região semiárida do nordeste do Brasil caracteriza-se por questões climáticas peculiares, como elevados níveis de radiação solar e baixos índices pluviométricos mal distribuídos no tempo e espaço, além de apresentar alta evapotranspiração potencial. Nesse ambiente, predomina o bioma Caatinga, considerado o quarto maior bioma brasileiro (SOUZA, 2020). Ao longo da sua história, essa unidade biológica tem sido de suma importância para as populações residentes. Ao contrário do que muitos pensam, a Caatinga é extremamente rica no que se refere à fauna e à flora.

Faz parte das Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS), composta por espécies xerófilas e caducifólias adaptadas às variações edafoclimáticas e topográficas da região, o que afeta diretamente a dinâmica florestal. Sua biodiversidade faunística e florística destaca-se, sobretudo, pelo alto grau de endemismo, ou seja, espécies que ocorrem exclusivamente nesse ambiente (SOUZA et al., 2019).

Esse bioma apresenta diversas potencialidades, desde produtos madeireiros (marchetaria, lenha, carvão, estacas, entre outros) e não madeireiros (sementes, frutos, fibras, resinas, cascas, dentre outros). Entretanto, tais recursos têm sido explorados de forma insustentável na maioria das vezes, contribuindo para sua degradação (GARIGLIO et al., 2010). Diante disso, é de fundamental importância o estudo de diferentes estratégias para sua conservação, sendo a promoção do manejo florestal sustentável, embasado nos princípios da sustentabilidade, uma alternativa para melhor gerenciamento da floresta (PARIZOTTO et al., 2019).

O manejo florestal sustentável tem como base a administração florestal para obtenção de recursos para sua própria preservação e para a população que depende da floresta. Por meio da sua aplicação é possível conhecer as diversas interações e os processos dinâmicos das florestas, a exemplo da produção de volume e/ou biomassa, principalmente em área de Caatinga que apresenta dois períodos bem distintos (seco e chuvoso) em termos de resposta da vegetação.

Para que se possa manejar corretamente e entender os processos dinâmicos de uma área florestal, faz-se necessário conhecê-la. Para tanto, recomenda-se o inventário florestal contínuo (IFC), ou seja, a instalação de parcelas permanentes. Essa metodologia permite o monitoramento e o acompanhamento da floresta, bem como a compreensão das taxas de incremento, ingresso/recrutamento e mortalidade.

Assim, o uso do sensoriamento remoto tem se destacado devido à possibilidade de obter respostas dos alvos sem que haja contato físico com os mesmos. Em outras palavras, é possível estudar uma floresta, acompanhar sua produção de biomassa e monitorar seu crescimento a partir de sensores diversos, em diferentes níveis (terrestre, suborbital e orbital), com distintas resoluções espaciais e temporais, associados com variados comprimentos de onda, e relacioná-los aos elementos estruturais da vegetação. A partir de técnicas de processamento, conhecidas como Índices Espectrais (IE), exploram-se os detalhes presentes nas cenas, sejam elas oriundas de satélites ou drones (CAETANO et al., 2022).

No contexto atual, é imprescindível a utilização dessas técnicas para o estudo e compreensão de parâmetros florestais como estoques de volume, biomassa, carbono, entre outros, sobretudo no cenário de alterações climáticas globais.

Pesquisas quanto a Índices Espectrais em áreas de florestas secas, especialmente para o bioma Caatinga, são incipientes, devendo-se realizar estudos relacionados a modelagem e aplicação de novas metodologias, principalmente com aprendizagem de máquina, em virtude da celeridade, precisão e potencial de análise.

Para atender os objetivos desta pesquisa, a dissertação foi estruturada em dois artigos, a saber:

1. Artigo I: Análise da estimativa de volume e biomassa florestal em área de Caatinga manejada, Bahia.
2. Artigo II: Estimativa de volume e biomassa florestal em área de Caatinga manejada a partir de Índices Espectrais.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL DA CAATINGA

Sabe-se que a utilização dos recursos naturais sempre foi necessária ao longo da história e da evolução da humanidade, de modo que, atualmente, tal necessidade não é diferente, pois dependemos deles para a sobrevivência. Entretanto, a questão maior reside na maneira como usamos o que a natureza nos oferece, tendo em vista a finitude de tais recursos.

A resolução Conama Nº 507, de 18 de julho de 2024, estabelece parâmetros técnicos a serem adotados na elaboração, apresentação, avaliação técnica e execução de Plano de Manejo Florestal Sustentável (PMFS) com fins madeireiros, para florestas nativas e suas formas de sucessão no bioma Caatinga (BRASIL, 2024).

Dessa forma, o Manejo Florestal Sustentável (MFS) pode ser definido como a administração da floresta com a finalidade de obter benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se as interações dentro dos ecossistemas, considerando-se o uso de múltiplas espécies madeireiras, de diversos produtos e subprodutos não-madeireiros, bem como a utilização de outros bens e serviços de natureza florestal (MIRANDA et al., 2022).

De outro modo, o MFS é o conjunto de intervenções aplicadas em dada área florestal com a finalidade de obter produtos e serviços da floresta de maneira continuada, sem comprometer sua capacidade produtiva (MMA, 2008).

Segundo Silva et al. (2021), o MFS promove a reflexão da sociedade ao permitir que a economia cresça sem prejudicar a sustentabilidade e a preservação do meio ambiente. De acordo com pesquisas realizadas por Pareyn (2010), sobre os recursos florestais nativos e sua gestão, o MFS pode ser impulsionado por algumas medidas, por exemplo:

- fortalecimento da fiscalização para controlar e reduzir a produção e o comércio ilegal de produtos florestais;
- promoção mediante isenção de taxas, pagamento de serviços ambientais e incentivos fiscais, tanto para o proprietário das florestas como para o consumidor do produto florestal que adote essa prática;

- fornecimento de assistência técnica específica aos pequenos proprietários e aos assentamentos rurais; e
- agilização da análise e aprovação dos planos de manejo pelos órgãos competentes, por meio da priorização efetiva dos processos e por intermédio de emissão de autorizações preliminares, nos casos em que ocorrerem pendências administrativas.

No que se refere ao bioma Caatinga, durante muito tempo foi estigmatizado e considerado “um ambiente sem vida” (SILVA et al., 2021). Todavia, o entendimento e a valorização dessa unidade biológica iniciam-se a partir da compreensão do próprio nome Caatinga, que significa “mata branca”, em razão do seu aspecto acinzentado durante o período seco, devido ao processo de caducifolia (perda das folhas) com a finalidade de economizar água para vencer esse período restritivo (SOUZA, 2020).

As principais causas de degradação no Nordeste brasileiro, onde a Caatinga está inserida, seja do solo ou da vegetação, decorrem da ação antrópica sobretudo no uso e manejo incorreto dos ecossistemas florestais (RABELO, 2021), provocando desmatamento, queimadas, perda de serapilheira e, conseqüentemente, danos à mesofauna do solo (SANTOS et al., 2018). Sendo assim, é premente a preservação aliada ao manejo florestal sustentável dos recursos ambientais a fim de minimizar os impactos citados, visto que algumas áreas estão susceptíveis à desertificação (SOUZA, 2020).

Gariglio et al. (2010) enfatizaram que o manejo florestal pouco foi considerado como ferramenta de planejamento das atividades de produção na região semiárida e que a sua utilização ainda não provocou os impactos desejados e necessários. Isso ocorre sobretudo pelo desconhecimento do potencial que o MFS proporciona e da própria Caatinga, que apresenta uma flora resiliente, adaptada às condições locais.

Corroborando com os autores ora citados, Silva et al. (2021) ressaltaram que é possível ter um MFS dos recursos florestais nesse bioma em virtude das potencialidades da vegetação. Além disso, a exploração sustentável também pode contribuir para o desenvolvimento econômico do Nordeste, melhorando a qualidade de vida da população.

Como forma de valorizar e disseminar o MFS no bioma Caatinga, foi criada em 2003 a Rede de Manejo Florestal da Caatinga (RMFC), com recursos do Programa Nacional de Florestas (PNF/MMA), apoiada pelo Projeto Conservação e Uso

Sustentável da Caatinga (Projeto MMA/PNUD/GEF/BRA/02/G-31) e pelo Serviço Florestal Brasileiro (SFB). A RMFC visa atender aos seguintes objetivos: obter dados sobre produção, incremento, regeneração, diversidade e dinâmica dos recursos florestais; aumentar as bases de pesquisas voltadas às formações vegetacionais do bioma Caatinga; adequar e executar técnicas experimentais e dendrométricas cabíveis às avaliações dos efeitos do manejo florestal na floresta nativa; relacionar os diferentes fatores técnicos, econômicos e ambientais de práticas de manejo; entre outros objetivos (GARIGLIO et al., 2010).

Dentre as principais técnicas de intervenção utilizadas para o manejo florestal na Caatinga, destacam-se: o corte raso ou talhadia simples, que consiste na supressão total da vegetação; e o corte seletivo ou talhadia seletiva. Esta última é feita de duas formas: a primeira consiste no corte por diâmetro mínimo, isto é, cortam-se as árvores acima de um diâmetro predeterminado, ao passo que a segunda seria por meio do corte seletivo por espécie, ou seja, ambas as formas têm como finalidade a obtenção de certos produtos desejados de determinadas espécies (MMA, 2008).

Apesar dessas orientações, o manejo florestal não tem sido realizado como se recomenda. Segundo estudo realizado por Barbosa (2023), os eventos de secas repentinas e extremas têm se intensificado acentuadamente nas últimas décadas, causando grandes impactos, como degradação dos solos, perda de cobertura vegetal e alterações climáticas, elevando a temperatura e diminuindo a quantidade de nuvens na região semiárida, ou seja, restringindo a precipitação. Além disso, constatou-se que as áreas áridas aumentaram em decorrência do manejo florestal incorreto dos recursos ambientais, causando insustentabilidade sobretudo pelas ações antrópicas.

Em outro trabalho, Silva et al. (2021) enfatizaram que um grande número de espécies (fauna e flora) da Caatinga é utilizado nas atividades do sertanejo, com destaque para obtenção de carvão mineral, desflorestamento para a ampliação de pastagem e agricultura, que contribui com as queimadas para o preparo do solo.

Embora haja tais impactos, Lopes et al. (2020) ressaltaram que a Caatinga ainda é pouco conhecida cientificamente e que 41% das áreas preservadas possuem apenas 25 campos de monitoramento que basicamente não são considerados para realização de novas pesquisas. Nesse sentido, Silva et al. (2021) concluíram que, se não houver MFS, ocorrerá a desertificação e extinção de espécies em grandes áreas.

2.2 ESTIMATIVA DA BIOMASSA FLORESTAL

A biomassa refere-se à matéria de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal, que possua atributos para geração de energia ou combustíveis (ELOY, 2013). Seu conhecimento é fundamental para a compreensão das interações, sejam elas relacionadas à flora ou à fauna, e dos processos dinâmicos das florestas.

Os trabalhos desenvolvidos sobre biomassa florestal possuem diferentes finalidades, destacando a ciclagem de nutrientes, fins energéticos, avaliação da dinâmica e crescimento das florestas, entre outras. Ademais, fatores climáticos ligados à concentração de gases de efeito estufa (GEEs), principalmente o dióxido de carbono (CO₂), têm despertado a curiosidade de novos estudos, tendo em vista o papel que as florestas exercem no sequestro de carbono e em sua captura da atmosfera (SANQUETTA et al., 2014).

Segundo Watzlawick, Kirchner e Sanquetta (2009), são dois os métodos utilizados para quantificação de biomassa florestal: direto e indireto. No método direto (método destrutivo), as árvores são cortadas e seus componentes, separados e pesados, ao passo que no método indireto (método não-destrutivo) são aplicadas equações alométricas ou utilizadas técnicas de sensoriamento remoto para realizar a estimativa. Para Ratuchne et al. (2016), as metodologias utilizadas para obtenção de estimativas acerca da biomassa florestal baseiam-se, essencialmente, em dados de inventário florestal, aplicando-se equações que estimam a variável de interesse a partir de informações dendrométricas coletadas em campo, como diâmetro e altura das espécies vegetais.

O uso do sensoriamento remoto (SR) na predição da biomassa florestal tem ganhado destaque no contexto atual, visto que os dados provenientes de imagens de satélites são tecnicamente mais fáceis e menos dispendiosos, bem como oferecem alto nível de confiança e acurácia na obtenção dessas informações (MIGUEL et al., 2015; COSTA, 2022). Santana et al. (2018) enfatizaram que o uso de métodos ou técnicas precisas para estimativa da biomassa florestal é fundamental, pois auxilia nos processos de administração, tomada de decisão e conservação da flora nativa.

Francisco et al. (2013) estimaram a degradação da biomassa vegetal para a bacia hidrográfica do rio Taperoá, no estado da Paraíba, utilizando imagens de satélite de média resolução espacial (pixel de 30 x 30 m) e Índices Espectrais e constataram que 61,98% da área útil da bacia estavam em processo de perda de biomassa e

degradação. Já Ribeiro et al. (2014) analisaram a degradação ambiental entre 1987 e 2009 utilizando imagens de satélite de média resolução espacial por meio do Índice Espectral NDVI para o município de Sumé, Paraíba, e concluíram que houve uma recuperação da vegetação, principalmente para a classe arbórea subarbórea densa de 10,96%, seguida da classe subarbórea densa de 24,52%. Estudos assim permitem monitorar e entender o comportamento da vegetação ao longo do tempo, bem como inferir sobre a influência das ações antrópicas no meio ambiente.

Em outro trabalho, que avaliou a relação entre Índices Espectrais e a biomassa estimada por meio de equações alométricas em diferentes áreas de floresta de Caatinga brasileira a partir de imagens de satélite de média resolução espacial para o ano de 2011 e 2012, Luz et al. (2022) verificaram que a relação entre os parâmetros foi moderada, com coeficiente de correlação (r_s) variando entre 0,64 e 0,58. Entretanto, para o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), a equação apresentou um melhor ajuste, com coeficiente de determinação de $R^2 = 0,50$, $R^2_{aj} = 0,49$, $RMSE = 17.18 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e erro médio absoluto de predição (MAE) = $14.07 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Segundo Ponzoni, Shimabukuro e Kuplich (2012), o SAVI, além de possuir um fator de correção para os efeitos do solo, apresenta maior sensibilidade a copas menos densas, esparsas, como ocorre na maior parte da vegetação de Caatinga, confirmando seu resultado no trabalho supracitado.

Alguns trabalhos sobre estimativa de volume de madeira, ajuste de modelos e determinação de equações alométricas foram realizados na Floresta Nacional de Contendas do Sincorá, a saber: Lima et al. (2020) e Pereira et al. (2021). Com relação ao estudo da biomassa nessa mesma área, Virgens et al. (2017) selecionaram e abateram as árvores representativas das nove espécies de maior densidade populacional, por meio do fator de expansão de biomassa (FEB) médio. Em outro trabalho, que buscou modelar e mapear a distribuição espacial do estoque potencial de biomassa florestal em 32 fragmentos florestais da Caatinga, no estado da Bahia, Brasil, sendo um desses fragmentos a FLONA, Santos et al. (2023), utilizando técnicas de krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância, concluíram que o modelo apresentou potencial para estimativa da biomassa, todavia são necessários estudos adicionais com maior intensidade amostral e o uso de outras variáveis para melhor ajuste do modelo.

2.3 MODELAGEM FLORESTAL NA CAATINGA

As florestas são compostas por árvores de muitas espécies, de tamanhos e portes distintos, com variadas idades, e que crescem sobre a influência de diferentes condições ambientais. Nesse contexto, torna-se necessária a busca de técnicas precisas e adequadas para entender a dinâmica e produção florestal, principalmente com a aplicação de modelagem.

De acordo com Maestri et al. (2013), um modelo poder ser definido como uma abstração ou representação de aspectos da realidade. Assim, o modelo de crescimento e produção florestal é uma ferramenta matemática capaz de representar o comportamento da dinâmica vegetal de uma dada floresta, por exemplo. A partir dessas informações é possível analisar os resultados obtidos e gerenciar processos de tomadas de decisão.

A aplicação da modelagem é fundamental sobretudo quando associada com o sensoriamento remoto, tendo em vista que se torna possível a utilização de imagens de satélites/drones a partir de diferentes sensores com distintas resoluções espaciais e temporais, conferindo celeridade, precisão, alto nível de confiança e acurácia das informações obtidas. Além do mais, dependendo da finalidade do estudo, pode-se aplicar técnicas de processamento de imagens (Índices Espectrais) para analisar determinadas variáveis nas florestas, como biomassa, volume de madeira, avaliação das mudanças fenológicas, entre outras.

Por meio da combinação de diferentes comprimentos de onda, principalmente na região do visível e do infravermelho próximo, obtêm-se os Índices Espectrais. Estes destacam propriedades particulares da vegetação, como a porcentagem de cobertura verde em uma floresta, o teor de clorofila, a radiação fotossinteticamente ativa, entre outras características (JENSEN, 2009; BERTOLIN et al., 2017).

Os trabalhos desenvolvidos sobre modelagem para o bioma Caatinga concentram-se no ajuste de funções de densidade de probabilidade da distribuição diamétrica de espécies arbóreas, entre os quais: Marangon et al. (2016), Castro et al. (2016), Figueiredo e Figueiredo (2019), Lima et al. (2020). Entretanto, não foram encontradas pesquisas com modelagem utilizando Índices Espectrais de espécies florestais para o bioma em questão, o que ressalta ainda mais a importância do tema e da determinação de modelos adequados.

Chaves et al. (2015) realizaram um estudo visando apresentar um modelo paramétrico simplificado para prognosticar a degradação das terras da bacia hidrográfica do rio Taperoá, no Estado da Paraíba. Os resultados mostraram que o modelo proposto pôde prognosticar com fidelidade a degradação das terras da bacia: apesar dos altos níveis de degradação da vegetação (59,2%) e da susceptibilidade dos solos à erosão (59,4%), a declividade plana e suave ondulada em 87% das terras contribuiu para minimizar o prognóstico da degradação, que apresenta o predomínio do grau médio de intensidade em 46,2% da bacia.

Em outro trabalho, Leda, Gonçalves e Lima (2019) buscaram modelar as correlações de produtividade da cana-de-açúcar a partir de Índices Espectrais obtidos por meio de análise de imagens orbitais e constataram que as modelagens foram satisfatórias, com coeficiente de determinação variando entre 0,15 e 0,97, sendo esse valor maior em períodos de colheita.

2.4 ÍNDICES ESPECTRAIS (IE)

Índices Espectrais são medidas radiométricas adimensionais que integram duas ou mais bandas espectrais e exploram detalhes presentes nas imagens, sejam elas provenientes de satélites ou drones, por exemplo (JIANG et al., 2008).

Faz parte dos produtos do sensoriamento remoto, o qual é definido como uma ciência de obtenção de imagens por meio de sensores acerca de alvos/objetos na superfície terrestre sem que seja preciso estar em contato físico com os mesmos (MENEZES e ALMEIDA, 2012).

A partir do avanço dos instrumentos de aquisição e processamento de dados espaciais, tornou-se possível representar e quantificar objetos/alvos e fenômenos da superfície terrestre, auxiliando no seu mapeamento. As tecnologias direcionadas ao meio ambiente representam uma ferramenta importante para estudiosos de diferentes áreas, uma vez que fornecem informações fundamentais que auxiliam nos processos de planejamento e tomada de decisão (AZEVEDO e BARBOSA, 2020).

As técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo amplamente aplicadas no monitoramento de coberturas vegetais, a fim de avaliar seu comportamento espacial e/ou temporal, bem como permitem o estudo de parâmetros físicos associados, por exemplo, ao solo, à quantificação de biomassa, à detecção de modificações fenológicas, dentre outros (SILVA JÚNIOR et al., 2021).

Estas pesquisas são possíveis em razão da utilização de sensores em nível terrestre, suborbital e orbital, com diferentes resoluções espaciais e temporais, explorando as propriedades espectrais da vegetação, principalmente a sua reflectância nas regiões do visível e infravermelho próximo, que são os principais comprimentos de onda que possuem interação com os elementos estruturais microscópicos que compõem o componente foliar (CAETANO et al., 2022).

O infravermelho possui propriedades que permitem a diferenciação das espécies vegetais, devido à reflectância da energia nessa faixa espectral. Dessa forma, é possível elaborar modelos matemáticos que relacionam diferentes bandas associadas ou não a coeficientes de ajustes para desenvolvimento dos Índices de Espectrais (IE), servindo como indicadores da qualidade da vegetação, permitindo analisar o comportamento e detectar alterações na flora (KUMAR et al. 2018; LOPES et al., 2020).

Dentre os IE, alguns se destacam, como: 1) *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), utilizado principalmente no monitoramento da biomassa vegetal; 2) *Soil-adjusted Vegetation Index* (SAVI), é semelhante à resposta do NDVI, porém com a adição de um fator de correção para os efeitos do solo nos resultados; 3) e o *Enhanced Vegetation Index* (EVI), que também avalia a biomassa vegetal, mas busca minimizar os efeitos do solo e da atmosfera, sendo este mais sensível às variações na estrutura da vegetação (CAETANO et al., 2022).

Alguns fatores podem interferir na captura pelos sensores, ao promover diferentes respostas espectrais, a saber: espaçamento entre árvores, idades distintas, estrutura da copa, espalhamento, abertura/fechamento do dossel e o tipo de floresta (nativa ou plantada) (DAI et al., 2021).

Apesar de existirem diferentes IE, o bioma Caatinga necessita de mais pesquisas voltadas à aplicação de Índices Espectrais com o intuito de determinar modelos e validar novos estudos (SILVA JUNIOR et al., 2021).

ARTIGO I

**ANÁLISE DA ESTIMATIVA DE VOLUME E BIOMASSA FLORESTAL EM
ÁREA DE CAATINGA MANEJADA, BAHIA**

*Manuscrito nas normas da Revista de Geociências do
Nordeste (REGNE): ISSN: 2447-3359*

Análise da Estimativa de Volume e Biomassa Florestal em Área de Caatinga Manejada, Bahia

Analysis of Forest Volume and Biomass Estimation in Managed Caatinga Area, Bahia

Resumo: Este trabalho teve como objetivo estimar e analisar a biomassa florestal em área de Caatinga manejada, após oito anos de recuperação, na Floresta Nacional de Contendas do Sincorá, Bahia. O experimento foi composto de 48 parcelas fixas de 20 m x 20 m, divididas igualmente em três unidades amostrais, que correspondem a três tipos de manejo e uma condição de Caatinga não manejada. Os dados foram obtidos por meio de inventário florestal em 2023. Durante o inventário foram identificados e mensurados todos os indivíduos arbóreos que apresentaram Diâmetro à Altura do Peito (DAP) igual ou superior a 5 cm com o auxílio de uma suta, e a altura (H). A estimativa da biomassa florestal foi feita a partir da conversão de volume, usando quociente de forma (0,81) validado para a área, e densidade básica das espécies conforme a literatura. As análises estatísticas foram realizadas pelo programa Past 4.02. A estimativa de biomassa pela conversão de volume e equação foi estatisticamente similar, entretanto recomenda-se a aplicação da conversão de volume na área avaliada pelo maior número de trabalhos desenvolvidos e por considerar a densidade básica de cada espécie. O tratamento CSE foi semelhante ao tratamento testemunha, indicando que o mesmo se encontra muito próximo à condição pré-corte em 2015. Novas pesquisas a partir de métodos indiretos devem ser realizadas em áreas de florestas secas, sobretudo em área de caatinga, tendo em vista suas diferentes tipologias florestais.

Palavras-chave: Conversão de volume. Floresta seca. Floresta Nacional de Contendas do Sincorá.

Abstract: This work aimed to estimate and analyze forest biomass in a managed Caatinga area, after eight years of recovery, in the Contendas do Sincorá National Forest, Bahia. The experiment was composed of 48 fixed plots measuring 20 m x 20 m, divided equally into three sampling units. The data were obtained through a forest inventory in 2023. During the inventory, all arboreal individuals that had a Diameter at Breast Height (DBH) equal to or greater than 5 cm were identified and measured with the aid of a suta, and their height (H). Forest biomass was estimated based on volume conversion, using a shape quotient (0.81) validated for the area, and basic species density according to the literature. Statistical analyzes were performed using the Past 4.02 program. The biomass estimate by volume conversion and equation was statistically similar, however, it is recommended to apply volume conversion in the area evaluated by the largest number of studies developed and to consider the basic density of each species. The CSE treatment was similar to the Control treatment, indicating that it is very close to the pre-cutting condition in 2015. New research using indirect methods should be carried out in dry forest areas, especially in caatinga areas, considering their different forest typologies.

Keywords: Volume Conversion. dry forest. Contendas do Sincorá National Forest.

1. Introdução

A quantificação de parâmetros florestais como volume e biomassa florestal acima do solo é fundamental para o entendimento dos processos dinâmicos das florestas, ciclagem de nutrientes, entre outros, ao mesmo tempo que propicia respostas sobre a qualidade de vida nos diferentes ecossistemas do planeta. Sendo assim, as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (SDTF, *Seasonally Dry Tropical Forests*) constituem alternativas diretas para compreender o fenômeno das mudanças climáticas, principalmente em regiões semiáridas tão impactadas por ações antrópicas, resultando em ambientes cada vez mais secos e quentes (Barbosa, 2023).

A Caatinga faz parte das Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (SDTF, *Seasonally Dry Tropical Forests*) e apresenta um conjunto de características que reforçam seu potencial e identidade, como: comportamento distinto da vegetação marcante no período seco e chuvoso, resistência às flutuações ambientais e alta capacidade adaptativa e fenotípica. Além disso, sua biodiversidade faunística e florística destaca-se, sobretudo, pelo alto grau de endemismo, ou seja, espécies que ocorrem exclusivamente no bioma. Esta unidade biológica representa 11% do território nacional e é considerada a quarta maior unidade biológica brasileira (Souza, 2020; Caetano *et al.*, 2022).

Apesar do potencial econômico, ambiental, social e cultural que existe nesse bioma, a Caatinga tem sofrido com alterações e pressões antrópicas ao longo de sua história, principalmente com o desflorestamento, visando à retirada de madeira para geração de energia, como também em virtude da supressão vegetal para expansão de novas áreas para práticas agrícolas e pecuárias, que provocam danos diretos à estrutura dos solos, levando a processos erosivos e mudanças na paisagem que podem ser irreversíveis (Marengo, Torres, Alves, 2017; Silva *et al.*, 2021).

Nesse sentido, essas ações predatórias interferem diretamente nos processos dinâmicos das florestas, diminuindo os estoques de biomassa, considerada uma ferramenta importante na avaliação e entendimento do funcionamento dos recursos florestais, pois por meio dela é possível conhecer o potencial de produção de madeira para fins energéticos, verificar o *status* de conservação da vegetação, compreender a ciclagem de nutrientes, desenvolver estudos sobre quantificação de carbono etc. (Virgens *et al.*, 2017). Luz *et al.* (2022) enfatizaram que

60 é preciso considerar os quantitativos de biomassa para que se possa realizar o monitoramento das mudanças
61 naturais e as ações antrópicas.

62 A determinação da biomassa de espécies arbustivo-arbóreas pode ser realizada por meio do método direto e
63 indireto. O método direto é destrutivo, visto que é feito o abate e a pesagem dos componentes (raízes, caule, ramos
64 e folhas) dos indivíduos. Apresenta resultados mais precisos que o método indireto, entretanto requer maior tempo,
65 é mais oneroso e há limitações de aplicação quanto ao tamanho da área e tipologia vegetal, principalmente. O
66 método indireto, por sua vez, é considerado não-destrutivo, pois faz uso de equações alométricas (análise de
67 regressão) ou sensoriamento remoto (Dalla Lana *et al.*, 2018). Apesar de o método direto ser mais eficiente, Lima
68 Júnior *et al.* (2014) ressaltaram que as medições indiretas devem ser utilizadas por ocasionarem menor impacto ao
69 meio ambiente, necessitarem de menos mão de obra e possuem um menor custo financeiro.

70 Para a Caatinga, a produção de biomassa florestal é considerada baixa, quando comparada com outros biomas
71 brasileiros (Menezes, Sampaio, 2000; Sá e Silva, 2010; Alves *et al.*, 2017), em virtude, sobretudo, das condições
72 restritivas existentes no semiárido nordestino, como: elevados níveis de radiação solar, baixos índices
73 pluviométricos, com distribuição temporal e espacial irregular, e alta evapotranspiração potencial (Souza, 2020).
74 Entretanto, pesquisas sobre a estimativa de biomassa em florestas secas são de grande importância, tendo em vista
75 que permitem melhor compreensão do funcionamento dos ecossistemas e entendimento das interferências
76 antrópicas.

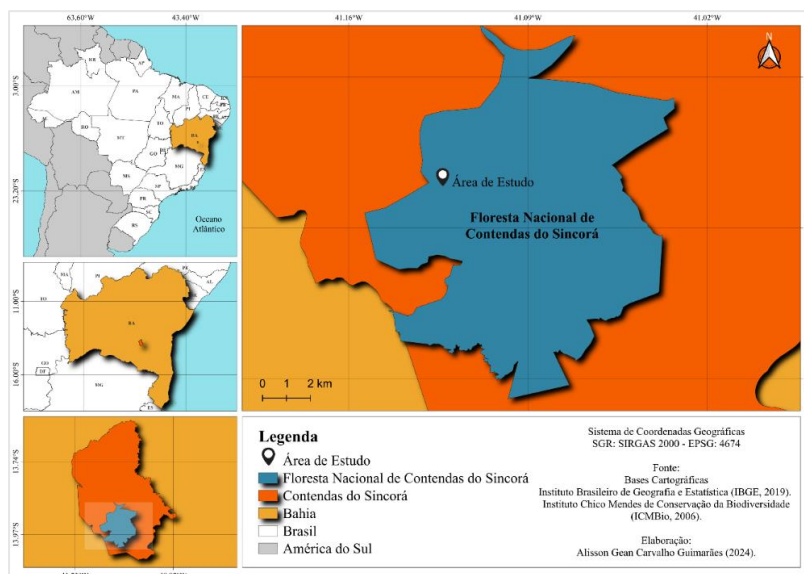
77 Existem alguns trabalhos que estimaram a biomassa florestal em área de Caatinga utilizando o método direto
78 ou indireto (Sampaio e Silva, 2005; Ribeiro *et al.*, 2010; Sampaio e Costa, 2011; Enes e Fonseca, 2013; Lima
79 Júnior *et al.*, 2014; Brand, 2017; Virgens *et al.*, 2017; Dalla Lana *et al.*, 2018; Sanquetta *et al.*, 2019; Luz *et al.*,
80 2022). Apesar destas pesquisas, estudos que envolvem a estimativa de biomassa florestal para esta unidade
81 biológica são escassos sobretudo para sua fisionomia arbórea (Virgens *et al.*, 2017 e Brandão *et al.*, 2020). Lima
82 *et al.* (2020) reforçaram que trabalhos com enfoque no monitoramento, mapeamento de alterações ambientais e
83 estimativas de parâmetros florestais são de grande relevância, pois se baseiam nos princípios do manejo florestal
84 sustentável, garantindo a continuidade dos serviços prestados.

85 Considerando as lacunas acerca desta temática e sua importância para o entendimento dos processos dinâmicos
86 das florestas, especificamente em florestas secas, esta pesquisa busca contribuir com informações relevantes ao
87 correlacionar dois métodos de estimativa de biomassa florestal que podem ser aplicados com rapidez e eficiência.
88 Dito isso, este trabalho teve como objetivo estimar e analisar o volume e a biomassa florestal em área de Caatinga
89 manejada, após oito anos de recuperação, na Floresta Nacional de Contendas do Sincorá, Bahia.

90 91 2. Metodologia

92 2.1 Caracterização da área de estudo

93 O estudo foi realizado em uma área experimental na Floresta Nacional de Contendas do Sincorá (FLONA),
94 que é uma unidade de conservação de uso sustentável, com área de 11.215,93 ha, localizada no município de
95 Contendas do Sincorá no estado da Bahia, Brasil (coordenadas geográficas: 13° 55' 21" S e 41° 06' 57" W, (Figura
96 1).



116 *Figura 1 – Localização Geográfica da Área Experimental na Floresta Nacional (FLONA) no Município de*
117 *Contendas do Sincorá, Bahia. Fonte: autor (2024).*

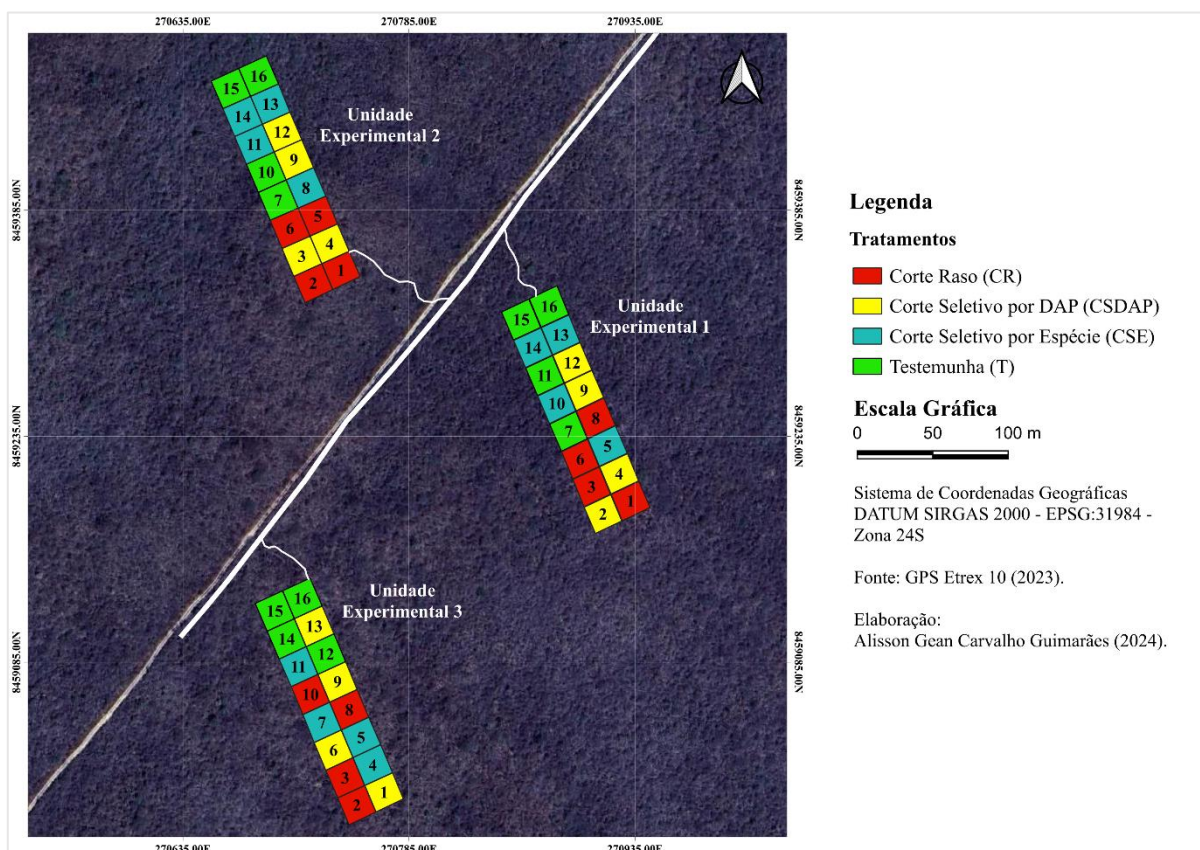
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143

A região possui clima semiárido (tipo BSw) de acordo com a Classificação de Köppen, apresentando clima quente e precipitação anual de cerca de 600 mm, concentrada no verão, de novembro a abril, e temperatura média anual de 23 °C. Com relação à altitude, de maneira geral, varia entre 295 e 380 m (Figura 2), e os solos são classificados como argissolos (Marinho *et al.*, 2020).

Sua vegetação é classificada como Savana-Estépica Florestada. Este subgrupo é estruturado basicamente em dois estratos: I) superior, com predomínio de plantas caducifólias mais ou menos adensadas por troncos grossos bem esgalhados, apresentando espinhos ou acúleos; e II) inferior, gramíneo-lenhoso, geralmente descontínuo e de pouca expressão fisionômica (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012).

2.2 Croqui experimental

O experimento foi composto de 48 parcelas fixas de 20 m x 20 m, divididas igualmente em três unidades experimentais, nas quais todas receberam quatro tratamentos, com quatro repetições cada (Figura 3). Os tratamentos foram: testemunha (T), que consiste na Caatinga não manejada; corte raso (CR): com remoção de todas as árvores e arbustos, independentemente do tamanho ou espécie (redução de 100% da área basal); corte seletivo por diâmetro mínimo (CSDAP): corte de todas as árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) maior ou igual a 5 cm (redução de 60 % da área basal); e corte seletivo por espécie (CES): corte de três espécies (*Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B. Gillet, *Jatropha molissima* (Pohl) Baill. e *Pseudobombax simplicifolium* A. Robyns) selecionadas devido à sua densidade populacional e por serem espécies com potencial de uso para diversos fins, como artesanato, marcenaria, fabricação de móveis e em obras de entalhe, caixotaria, objetos leves e utensílios caseiros (Carvalho, 2008; Lorenzi, 1998) (redução de 15 % da área basal). Com relação à espécie *J. molissima*, endêmica do bioma caatinga, além de ser importante no contexto do semiárido, apresenta usos na medicina tradicional e industrial, bem como é indicada para recuperação de áreas degradadas (Souza e Cavalcante, 2019).



144
145
146
147

Figura 3 – Croqui e localização das unidades experimentais na Floresta Nacional (FLONA), em Contendas do Sincorá, Bahia. Fonte: autor (2024).

148 Todas as unidades experimentais foram compostas por 16 parcelas e estão de acordo com a metodologia
149 recomendada pelo Comitê Técnico Científico da Rede de Manejo Florestal da Caatinga (Rede de Manejo Florestal
150 da Caatinga, 2005).

151 152 **2.3 Coleta dos dados e identificação das espécies**

153
154 Os dados foram obtidos por meio do Inventário Florestal Contínuo (IFC), em 2023. Tratou-se de uma
155 remediação, tendo em vista que os levantamentos iniciaram no ano de 2015, quando foram instaladas as parcelas
156 permanentes.

157 Durante o inventário foram identificadas as árvores e mensurados os seguintes parâmetros dendrológicos:
158 Diâmetro ao Nível da Base (DNB), Diâmetro à Altura do Peito (DAP) de todos os indivíduos que apresentaram
159 DAP igual ou superior a 5,0 cm com o auxílio de uma suta, e a altura (H). Os indivíduos que atingiram o nível
160 mínimo predefinido de inclusão foram considerados como “ingresso”.

161 A coleta do material botânico (folhas, flores e frutos) de todas as espécies incluídas no inventário seguiram as
162 técnicas de herborização, conforme Fidalgo e Bononi (1984). Todas as identificações foram de acordo com o
163 sistema de classificação adotado pelo APG IV (2016), e, para validação dos nomes científicos, foi utilizado o *The*
164 *Plant List* (2019) e a *Lista de Plantas da Flora do Brasil* (Flora do Brasil, 2019).

165 166 **2.4 Espécies imunes ao corte no Estado da Bahia**

167
168 Algumas espécies nativas da Caatinga são imunes ao corte no Estado da Bahia, como a *Astronium urundeuva*
169 (M. Allemão) Engl (Aroeira do Sertão), vedada pela Resolução N° 1.009 de 06 de dezembro de 1994, conforme o
170 Conselho Estadual de Meio Ambiente (CEPRAM); bem como a espécie *Spondias tuberosa* Arruda (Umbuzeiro),
171 proibida pela Lei Ordinária de nº 13.908 de 29 de janeiro de 2018. Dessa forma, para o tratamento Corte Raso
172 (CR), no ato da instalação do experimento em 2015, essas espécies continuaram presentes dentro da parcela,
173 conforme os atributos legais ora citados (Leis Estaduais da Bahia, 2025). Nesse sentido, o volume e a biomassa
174 florestal, para este tipo de manejo em específico, quando as espécies mencionadas estavam presentes dentro da
175 parcela, foram desconsiderados, a fim de evitar a influência dessas espécies na eficiência dos métodos testados.

176 Estas leis ressaltam a importância dessas espécies para o enriquecimento do semiárido/caatinga/cerrados do
177 Estado, além de ser parte do patrimônio biocultural que associa biodiversidade, agrobiodiversidade e cultura da
178 população de um território, expressadas pela conservação ambiental, pelos costumes, no uso artesanal para
179 diversos fins, no hábito alimentar, na manutenção da paisagem e conservação de seus recursos naturais (Leis
180 Estaduais da Bahia, 2025).

181 182 **2.5 Quantificação do volume florestal**

183
184 O volume cilíndrico das árvores foi determinado a partir da Equação 1. Por se tratar de uma área de Caatinga,
185 na qual muitas das espécies arbóreas ramificam-se antes de alcançarem a altura de 1,30 m acima do solo (medida
186 na qual é mensurado o Diâmetro à Altura do Peito – DAP), considerou-se o Diâmetro Equivalente (DEq) (Equação
187 2) para árvores que apresentavam mais de um fuste. O DEq considera que a área transversal (g) de uma árvore
188 com diversos fustes é equivalente à soma das áreas transversais individuais de cada fuste.

$$189 \text{Vol(cil)} = \frac{\pi \times (\text{DEq})^2}{40000} * H \quad (1)$$

190
191 Em que:

192
193 Vol (cil) = Volume Cilíndrico (m³)

194 $\pi = 3,1416$

195 DEq = Diâmetro Equivalente (cm)

196 H = Altura (m)

$$197 \text{DEq} = \sqrt{\sum \text{DAP}^2} \quad (2)$$

198
199 Em que:

200
201 DEq = Diâmetro Equivalente (cm)

202 DAP = Diâmetro à Altura do Peito (cm)

203

204 Entretanto, sabe-se que o tronco das árvores não forma um cilindro perfeito, mas apresenta uma conicidade ao
205 longo do fuste. Desse modo, utilizou-se um quociente de forma (0,81), validado para área de estudo no trabalho
206 de Pereira *et al.* (2020), para estimar o verdadeiro volume, ou seja, considerando a forma afunilada de crescimento
207 das espécies.

208

209 2.6 Quantificação da biomassa florestal

210

211 De posse dos dados de volume das espécies, realizou-se a conversão desses valores para biomassa. Para isso,
212 utilizou-se a densidade básica da madeira de cada espécie amostrada, embasada a partir de uma revisão de
213 literatura: Maia (2004); Zanne *et al.* (2009); Silva *et al.* (2011); Aguiar *et al.* (2019), Lorenzi (1998); Lorenzi
214 (2000); Carvalho (2003); Carvalho (2006); Carvalho (2008); Coradin, Camillo e Pareyn (2018); Lorenzi (2009);
215 Carvalho (2010) e Carvalho (2014). A biomassa foi obtida a partir da multiplicação da densidade básica da madeira
216 (kg/m^3) de cada espécie pelo volume real obtido a partir do quociente de forma determinado por Pereira *et al.*
217 (2020). Esta conversão pode ser entendida como vantajosa por tratar-se de um método não-destrutivo (Ribeiro *et*
218 *al.*, 2010).

219 Com o intuito de confrontar os dados de biomassa encontrados, aplicou-se uma equação potencial proposta por
220 Sampaio e Silva (2005), recomendada para área de Caatinga e utilizada por Lima Júnior *et al.* (2014) e Luz *et al.*
221 (2022). A biomassa das plantas com DAP entre 3 e 30 cm foi calculada a partir do DEq, conforme a Equação 3.

222

$$\text{Biomassa(kg)} = 0,1730 \times (\text{DEq})^{2,2950} \Rightarrow R^2 = 0,9184 \quad (3)$$

223

224 Para espécies que apresentaram DAP superior a 30 cm, utilizou-se a Equação 5, que considera a área seccional
225 à altura do peito (g, m^2) (Equação 4), a altura total do indivíduo (H, m) e a densidade da madeira ($\rho, \text{kg/m}^3$). Vale
226 ressaltar que somente quatro indivíduos apresentaram DAP superior a 30 cm, a saber: *Commiphora*
227 *leptophloeos* (Mart.) J.B. Gillett (três indivíduos) e a *Pseudobombax simplicifolium* A. Robyns.

228

$$\text{Área Seccional (m}^2\text{)} = \pi \times (\text{DEq})^2 / 40000 \quad (4)$$

$$\text{Biomassa(kg)} = 0,1648 \times (\text{g} \times \text{H} \times \rho)^{0,9023} \Rightarrow R^2 = 0,9573 \quad (5)$$

229

230 2.7 Análise dos dados

231

232 A diversidade para área foi determinada por meio do índice de diversidade de Shannon-Weaver (H') e o índice
233 de equabilidade de Pielou (J') (Brower, Zar, 1984; Felfili; Rezende, 2003). Esses parâmetros e índices foram
234 calculados por meio do programa "FITOPAC 2.1" (Shepherd, 2010).

235 O teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para testar a normalidade da distribuição dos dados, ao passo que a
236 homogeneidade de variâncias foi analisada pelo teste de Levene (Shapiro e Wilk, 1965). Como os dados não
237 atenderam aos critérios ora citados, realizaram-se testes não-paramétricos.

238 Para comparar a estimativa de biomassa florestal por parcela entre os métodos descritos (conversão de volume
239 e equação de Sampaio e Silva (2005)), considerando as três unidades experimentais, aplicou-se o teste de Mann-
240 Whitney, o qual é utilizado para determinar se as observações de uma população tendem a ser maiores ou menores
241 que outra população (Tucker, 1984; Wadsworth, 1990).

242 Para verificar diferenças entre os tratamentos, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis (1952), usado para
243 comparar múltiplos pares de medianas em um grupo de dados, seguido do teste de Dunn (1964), devido à
244 significância obtida. Todas as análises foram realizadas utilizando o programa Past 4.02 (Hammer *et al.*, 2001) a
245 5% de significância. Quando o valor de ($p < 0,05$), não houve diferença entre os dados; quando ($p > 0,05$), houve
246 diferença entre os mesmos.

247

248

249 3. Resultados e discussão

250 Na Tabela 1, pode-se observar, de um lado, que a unidade experimental 3 apresentou o maior número de
251 espécies e Diversidade (H'), de outro, na unidade experimental 2 observou-se maior número de famílias e
252 Equabilidade (J').

253

254

255

256

257

Tabela 1 – Número de famílias, espécies e índices avaliados em área de Caatinga Manejada, Bahia.

Parâmetros	Unidades Experimentais		
	1	2	3
	2023		
Nº de Famílias	12	15	14
Nº de Famílias Totais	17		
Nº de Espécies	32	29	36
Nº de Espécies Totais	52		
Diversidade (Shannon-Weaver) (H')	2,63	2,91	3,06
Equabilidade (Pielou) (J')	0,73	0,86	0,84

258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281

Fonte: autor (2024).

Os valores encontrados para o índice de diversidade de Shannon-Weaver suscitam que as unidades se encontram preservadas, pois, quanto maior o valor, maior é a diversidade de determinado ambiente. Já os valores de equabilidade indicam um equilíbrio entre o número de indivíduos por espécie, pois estes estão próximos de 1. Apesar disso, ao comparar estes resultados com os de Paula e Barreto-Garcia (2024) ao avaliarem a dinâmica florestal nesta área, verificou-se que a diversidade e a equabilidade foram superiores ao ano de 2018, mas inferiores à situação pré-corte em 2015, indicando que o ambiente se recupera de maneira gradativa.

Os resultados desta pesquisa foram superiores aos de Souza *et al.* (2021), que avaliaram uma área de Caatinga manejada, sob diferentes idades de corte: Reserva Legal (2,33), Unidade de Produção Anual 2007 (0,99), Unidade de Produção Anual 2012 (2,19) e Unidade de Produção Anual 2014 (1,35), em Cuité, Paraíba. A superioridade pode ser explicada pelas diferenças edafoclimáticas e influências antrópicas entre os dois ambientes de Caatinga estudados, principalmente.

A composição florística das unidades inventariadas na Floresta Nacional de Contendas do Sincorá apresentou 821 indivíduos distribuídos em 17 famílias, 38 gêneros e 52 espécies, conforme descritas na Tabela 2. Nela também é possível observar a estimativa de volume e de biomassa florestal pelos dois métodos utilizados para cada espécie, com destaque para *Aspidosperma pyriforme* Mart. & Zucc., *Astronium urundeuva* (M.Allemão) Engl e *Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B. Gillett, que apresentaram os maiores valores em função da quantidade de indivíduos e do porte dessas espécies.

Tabela 2 – Composição florística, estimativa de volume e de biomassa por espécie em área de Caatinga Manejada, Bahia, em que: Nind = Número de Indivíduos; Vol. real = Volume real (m³); ρ = Densidade Básica da Madeira; EP = Equação Potencial (Sampaio & Silva, 2005).

Famílias/Espécies	Nind	Volume (m³)	Estimativa de Biomassa (kg)	
			Vol. real x ρ	EP
Anacardiaceae				
<i>Astronium concinnum</i> Schott	2	0,315	337,549	221,086
<i>Astronium fraxinifolium</i> Schott	1	0,085	72,378	94,682
<i>Astronium urundeuva</i> (M.Allemão) Engl	37	5,017	6071,094	3285,116
<i>Cyrtocarpa caatingae</i> J.D.Mitch. & Daly	3	0,249	141,740	243,118
<i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl.	4	0,271	332,759	175,512
<i>Spondias tuberosa</i> Arruda	24	3,122	1904,681	3263,751
Annonaceae				
<i>Annona coriacea</i> Mart.	6	0,314	172,946	343,186
<i>Annona vepretorum</i> Mart.	47	1,536	1044,746	1481,678
Apocynaceae				
<i>Aspidosperma pyriforme</i> Mart. & Zucc.	86	7,829	7516,275	6244,317
Araliaceae				
<i>Aralia bahiana</i> J. Wen	2	0,068	33,930	59,253
Bignoniaceae				
<i>Anemopaegma album</i> Mart. ex DC.	1	0,011	8,063	12,696
<i>Handroanthus selachidentatus</i> (A.H.Gentry) S.Grose	12	0,970	824,529	846,142
<i>Handroanthus spongiosus</i> (Rizzini) S.Grose	7	0,108	90,919	99,089

Burseraceae					
<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J.B. Gillett	103	8,882	2669,821	5954,393	
Cactaceae					
<i>Quiabentia zehntneri</i> (Britton & Rose) Britton & Rose	9	0,542	189,703	640,558	
Celastraceae					
<i>Monteverdia rigida</i> (Mart.) Biral	1	0,230	227,891	192,818	
Combretaceae					
<i>Combretum monetaria</i> Mart.	2	0,074	52,013	56,778	
Cordiaceae					
<i>Cordia americana</i> (L.) Gottschling & J.S.Mill.	38	0,850	662,821	829,744	
<i>Cordia incognita</i> Gottschling & J.S.Mill.	57	1,761	1320,454	1696,312	
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	4	0,238	185,791	155,090	
Euphorbiaceae					
<i>Cnidocolus bahianus</i> (Ule) Pax & K.Hoffm.	4	0,068	32,789	57,932	
<i>Croton floribundus</i> Spreng.	2	0,036	21,422	26,778	
<i>Croton jacobinensis</i> Baill.	6	0,051	39,273	70,393	
<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl) Baill.	16	0,258	141,993	276,930	
<i>Manihot carthagenensis</i> (Jacq.) Müll.Arg.	129	2,706	1353,129	2479,503	
<i>Maprounea guianensis</i> Aubl.	2	0,059	42,234	49,212	
<i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong	21	0,693	297,843	584,066	
<i>Sebastiania brasiliensis</i> Spreng.	17	0,399	287,470	336,118	
Fabaceae					
<i>Albizia polycephala</i> (Benth.) Killip ex Record	6	0,091	57,929	84,445	
<i>Cenostigma pluviosum</i> (DC.) Gagnon & G.P.Lewis	11	0,579	521,509	505,793	
<i>Chloroleucon foliolosum</i> (Benth.) G.P. Lewis	3	0,223	120,443	234,599	
<i>Coursetia rostrata</i> Benth.	1	0,005	3,225	12,696	
<i>Dalbergia decipularis</i> Rizzini & A.Mattos	1	0,015	14,738	10,566	
<i>Leucochloron lima</i> Barneby & J.W.Grimes	4	0,054	37,499	50,358	
<i>Libidibia ferrea</i> (Mart. ex Tul.) L.P.Queiroz	1	0,222	263,603	184,501	
<i>Mimosa acutistipula</i> (Mart.) Benth.	13	0,371	296,883	343,303	
<i>Mimosa ophthalmocentra</i> Mart. ex Benth.	4	0,101	84,453	119,252	
<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	32	0,685	766,691	602,362	
<i>Pityrocarpa moniliformis</i> (Benth.) Luckow & R.W.Jobson	7	0,283	237,704	220,182	
<i>Pseudopiptadenia contorta</i> (DC.) G.P.Lewis & M.P.Lima	2	0,121	74,758	87,898	
<i>Senegalia fiebrigii</i> (Hassler) Seigler	1	0,013	8,040	9,019	
<i>Senegalia piauiensis</i> (Benth.) Seigler	7	0,173	121,245	139,385	
<i>Senegalia velutina</i> (DC.) Seigler & Ebinger	10	0,368	239,116	320,286	
Malvaceae					
<i>Ceiba boliviana</i> Britten & Baker f.	2	0,089	23,033	88,710	
<i>Ceiba speciosa</i> (A.St.-Hil.) Ravenna	1	0,009	5,194	8,296	
<i>Pseudobombax grandiflorum</i> (Cav.) A.Robyns	1	0,028	10,943	33,345	
<i>Pseudobombax simplicifolium</i> A. Robyns	54	3,506	645,492	2432,462	
Myrtaceae					
<i>Campomanesia sessiliflora</i> (O.Berg) Mattos	9	0,394	330,997	397,222	
Nyctaginaceae					
<i>Guapira opposita</i> (Vell.) Reitz	1	0,008	6,389	8,653	
Polygonaceae					
<i>Coccoloba alnifolia</i> Casar.	2	0,629	534,286	355,280	
<i>Coccoloba schwackeana</i> Lindau	2	0,444	385,930	280,183	
Rutaceae					
<i>Esenbeckia febrifuga</i> (A.St.-Hil.) A. Juss. ex Mart.	3	0,061	58,759	42,851	
Total	821	45,213	30925,116	36347,901	

Fonte: autor (2024).

282
283
284
285
286

Entre as 17 famílias encontradas, a Fabaceae apresentou o maior número de espécies (15), seguida de Euphorbiaceae (oito) e Anacardiaceae (seis), considerando todas as unidades experimentais. As espécies com o maior número de indivíduos em cada uma das famílias foram, respectivamente: *M. tenuiflora* (32), *M.*

287 *carthagenensis* (129) e *Astronium urundeuva* (37). Estes resultados são superiores aos de Santos *et al.* (2023a),
 288 que avaliaram a regeneração natural para a mesma área de estudo, encontrando 453 indivíduos, distribuídos em 18
 289 famílias, 29 gêneros e 31 espécies. Nesta pesquisa em questão, as famílias com maior número de espécies foram
 290 Fabaceae (oito) e Euphorbiaceae (quatro), porém este número de espécies é inferior ao do presente trabalho.
 291 Quanto ao número de indivíduos, Brito *et al.* (2022), ao analisarem a modelagem da distribuição diamétrica,
 292 encontraram um total de 794 indivíduos para as três unidades amostrais, semelhante a este estudo. Estes resultados
 293 indicam que a área se encontra em processo de reestabelecimento após oito anos da implementação das ações de
 294 manejo.

295 Na Tabela 3, apresenta-se a estimativa de biomassa florestal por parcela pela conversão de volume, bem como
 296 a partir da equação desenvolvida por Sampaio e Silva (2005). A parcela 11, na unidade 1, bem como as parcelas
 297 7, 12, 14 e 15, na unidade 3, obtiveram as maiores estimativas de volume e biomassa florestal por ambos os
 298 métodos. Todas essas parcelas receberam o tratamento testemunha, com exceção da parcela 7, que se trata do corte
 299 Seletivo por Espécie, indicando que, quanto menor o grau de intervenção, maior é a contribuição em biomassa da
 300 floresta.
 301

Tabela 3 – Estimativa de biomassa por parcela em área de Caatinga Manejada, Bahia, em que: $Vol. real =$
 $Volume\ real; \rho =$ Densidade Básica da Madeira; EP = Equação Potencial (Sampaio e Silva, 2005).

Unidade Experimental	Parcelas	Tratamentos	Estimativa de Biomassa (kg)	
			Vol. real x ρ	EP
1	1	CR	78,752	68,721
1	2	CSDAP	199,120	424,759
1	3	CR	78,690	84,623
1	4	CSDAP	658,973	934,923
1	5	CSE	1178,052	1160,869
1	6	CR	0,000	0,000
1	7	T	1385,586	2203,975
1	8	CR	0,000	0,000
1	9	CSDAP	15,115	21,132
1	10	CSE	587,647	755,893
1	11	T	1643,759	1875,017
1	12	CSDAP	174,332	361,193
1	13	CSE	589,222	842,075
1	14	CSE	816,805	894,160
1	15	T	916,242	1646,611
1	16	T	825,015	1609,990
2	1	CR	136,028	186,670
2	2	CR	96,595	246,339
2	3	CSDAP	1666,997	1133,587
2	4	CSDAP	615,725	731,119
2	5	CR	1034,305	1028,080
2	6	CR	222,163	238,400
2	7	T	1128,464	1124,857
2	8	CSE	480,649	511,461
2	9	CSDAP	484,365	1032,572
2	10	T	752,970	760,290
2	11	CSE	34,057	81,738
2	12	CSDAP	223,685	454,949
2	13	CSE	198,577	515,742
2	14	CSE	93,138	157,528
2	15	T	267,835	817,520
2	16	T	215,193	463,214
3	1	CSDAP	136,889	174,654
3	2	CR	597,470	284,418
3	3	CR	0,000	0,000
3	4	CSE	1460,067	1223,271
3	5	CSE	968,613	1026,287
3	6	CSDAP	828,625	586,419
3	7	CSE	1643,522	1711,785
3	8	CR	0,000	0,000
3	9	CSDAP	876,267	512,705

3	10	CR	0,000	0,000
3	11	CSE	1063,770	1116,703
3	12	T	1558,137	2063,013
3	13	CSDAP	384,011	573,081
3	14	T	1795,440	1486,249
3	15	T	1394,573	1657,593
3	16	T	1419,676	1563,715
Total	48	-	30925,116^{NS}	36347,901^{NS}
	parcelas			

^{NS} não significativo pelo Teste Mann-Whitney a 5% de significância. Fonte: autor (2024).

Não houve diferença entre o método de conversão de volume e a equação potencial na estimativa de biomassa florestal ($p = 0,416$). Em outras palavras, qualquer um dos métodos pode ser empregado na estimativa de biomassa em área de Caatinga. Entretanto, recomenda-se a aplicação da conversão de volume, sobretudo na área avaliada, pelo maior número de estudos realizados neste ambiente em específico e por considerar a densidade básica de cada espécie, o que confere maior precisão aos resultados. Além disso, de maneira geral, o método da equação potencial superestimou os valores de biomassa em detrimento ao método da conversão de volume. Isso se deve provavelmente à utilização do valor individual de densidade específica no primeiro método para todas as espécies avaliadas, uma vez que no segundo método apenas as espécies com DAP superior a 30 cm (quatro indivíduos) tiveram suas densidades básicas consideradas.

Estes resultados complementam pesquisa realizada por Virgens *et al.* (2017) para o mesmo ambiente de estudo, em que avaliaram os estoques de biomassa e sua distribuição nos componentes da parte aérea de espécies florestais de maior densidade populacional pelo método direto encontrando um total de biomassa seca de $29,2 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$, sendo a espécie *C. leptophloeos* a que se destacou.

Ao quantificarem os estoques em volume, biomassa e carbono na madeira de um fragmento de Caatinga Arbustiva-Arbórea, na região Nordeste do Brasil, no Município de Caicó, Rio Grande do Norte, Santos *et al.* (2016) obtiveram um estoque volumétrico de madeira igual a $15,5 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, e a biomassa foi de $12 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. Resultado inferior ao encontrado no presente estudo, independentemente da área. Segundo os autores, os valores baixos de estimativa de biomassa justificam-se pelo fato de o bioma ser formado por árvores de pequeno porte e apresentar distribuição espaçada, além da floresta avaliada possuir cerca de 20 anos de idade, promovendo baixos incrementos anuais. Santos *et al.* (2023a) relataram que os estoques de biomassa são influenciados diretamente pela precipitação, temperatura, relevo e altitude dos ambientes florestais.

Ainda na Tabela 2, observa-se, de modo geral, que tratamentos com menor grau de intervenção (Testemunha e CSE) tendem a contribuir com maior incremento de biomassa, ao passo que tratamentos com maior intensidade de manejo (CSDAP e CR) contribuem com menos. Com relação ao tratamento CR, nas parcelas 6 e 8, na unidade experimental 1, e na parcela 3 e 10, na unidade experimental 3, não houve nenhum ingresso (espécie que atingiu o limite mínimo para ser mensurada), mas existem espécies abaixo do diâmetro mínimo de inclusão. Isto significa que o ambiente se encontra em processo de recuperação após oito anos da instalação do experimento. Observando os dados do levantamento, as espécies mensuradas nas demais parcelas com CR foram: *A. pyrifolium*, *S. brasiliensis*, *C. caatingae*, *C. americana*, *A. vepretorum*, *S. glandulosum*, *C. pluviosum*, *M. carthagenensis*, *M. tenuiflora*, *P. simplicifolium*, *C. leptophloeos*, *M. acutistipula* e *J. mollissima*. O aparecimento dessas espécies se deve possivelmente à ocorrência dessas espécies nas parcelas subjacentes favorecendo a dispersão e colonização desses espaços (clareiras) com maior incidência solar. Além disso, Paula e Barreto-Garcia (2024), avaliando a dinâmica florestal nessa mesma área, ressaltaram que nas parcelas que receberam o CR houve brotação das cepas de algumas espécies, aumentando o recrutamento.

Com relação às unidades experimentais, a unidade experimental 3 foi a que apresentou as maiores estimativas de biomassa florestal em comparação com as outras. Isto se deve possivelmente à maior frequência de espécies com maior porte nas parcelas dessa unidade experimental, a saber: *A. urundeuva*, *C. leptophloeos* e *S. tuberosa*. São consideradas espécies nativas do bioma Caatinga e apresentam, geralmente, uma alta área basal, DAP e altura consideráveis, quando em comparação com outras espécies dessa mesma unidade biológica. Estas árvores desempenham um papel ecológico, medicinal e econômico muito importante, como a facilitação para o surgimento de novas espécies, recuperação de áreas degradadas e utilização de seus produtos madeireiros e não-madeireiros para diversos fins, incluindo produtos medicinais (Coradin; Camillo e Pareyn, 2018).

Quanto à estimativa de biomassa florestal entre os tratamentos, o resultado foi significativo ($p = 0,00023$), apontando diferenças para os tratamentos (Tabela 4).

Tabela 4 – Diferenças na estimativa de biomassa entre tratamentos em área de Caatinga Manejada, Bahia. Teste de Dunn a 5% de significância, em que: CR = Corte Raso; CSDAP = Corte Seletivo por DAP; CSE = Corte Seletivo por Espécie e T = Testemunha.

Tratamentos	Média da Biomassa
CR	187,000 a
CSDAP	522,009 b
CSE	759,510 bc
T	1108,574 c

OBS.: Médias seguidas de uma mesma letra não diferem pelo Teste de Dunn ($P > 0,05$). Fonte: autor (2024).

354

355 A partir dos resultados da Tabela 4, visualiza-se que o tratamento Testemunha foi superior aos demais, exceto
356 do CSE, enquanto o CSE foi similar ao CSDAP e diferente do CR, e o CSDAP foi superior ao CR. Isto indica que,
357 passados oitos anos da implantação do experimento, há um processo de recuperação gradativo das espécies dentro
358 das parcelas. Ou seja, oito anos não foram suficientes para que os tratamentos retornassem à condição anterior à
359 implantação.

360 O CSE não diferiu do tratamento Testemunha, ou seja, após oito anos da instalação das parcelas permanentes,
361 este tratamento, em termos estatísticos, foi similar à área não manejada, reduzindo o ciclo de corte para sua
362 exploração, sendo entendido possivelmente como o tratamento ideal para explorar uma floresta de acordo com
363 princípios sustentáveis. Oliveira *et al.* (2024) avaliaram a dinâmica da vegetação de Caatinga na unidade
364 experimental da Embrapa Semiárido em Petrolina, Pernambuco, e concluíram que, para as parcelas que sofreram
365 o corte raso, estima-se um ciclo de 22 a 34 anos para que o estoque volumétrico de madeira seja compatível com
366 os valores da vegetação não-manejada (Testemunha). Nesse sentido, é provável que a recuperação do tratamento
367 CR à condição pré-corte fique dentro desse intervalo.

368

369 4. Considerações finais

370 Não houve diferença na estimativa de biomassa florestal entre o método de conversão de volume e equação
371 potencial. Entretanto, recomenda-se a aplicação da conversão de volume na área avaliada pelo maior número de
372 pesquisas desenvolvidas no ambiente de estudo e por considerar a densidade básica de cada espécie de todas as
373 espécies.

374 O tratamento CSE foi semelhante ao tratamento Testemunha, indicando que o mesmo se encontra muito
375 próximo à condição pré-corte em 2015.

376 Recomenda-se a aplicação dos métodos aqui utilizados em outros tipos de florestas secas, sobretudo em área
377 de Caatinga, tendo em vista suas diferentes tipologias florestais, decorrentes dos padrões de precipitação,
378 temperatura, altitude, solo, relevo, entre outros fatores.

379

380 Agradecimentos

381 Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela
382 concessão da bolsa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio
383 financeiro ao projeto (processo nº 88887.824010/2023-00). Ao ICMBio do estado da Bahia pela permissão para
384 desenvolver esta pesquisa na Floresta Nacional Contendas do Sincorá (FLONA) e ao Laboratório de Ecologia e
385 Proteção Florestal (LEPFlor) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, *campus* de Vitória da
386 Conquista.

387

388 Referências

389 Aguiar, G. R.; Menezes, H. F.; Barbosa, I. B. S.; Anjos, J. V. R.; Miranda, L. N. N.; Sartori, C. J. Determinação da
390 densidade básica da madeira de roxinho (*peltogyne* spp). Seminário de Inovação Científica. **Inovação**
391 **Planeta**. 2019.

392 Alves, A. R.; Ferreira, R. L. C.; Silva, J. A. A.; Duveux Júnior, J. C. B.; Osajima, J. A.; Holanda, A. C. Conteúdo
393 de nutrientes na biomassa e eficiência nutricional em espécies da caatinga. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p.
394 377-390, 2017.

395 APG IV. Angiosperm Phylogeny Group. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the
396 orders and families of flowering plants: APG IV. The Linnean Society of London, **Botanical Journal of the**
397 **Linnean Society**, v. 181, p. 1-20, 2016.

- 398 Barbosa, H. A.; Flash Drought and Its Characteristics in Northeastern South America during 2004–2022 Using
399 Satellite-Based Products. *Atmosphere*, v. 14, n. 1629. 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14111629>
- 400 Brand, M. A. Potencial de uso da biomassa florestal da caatinga, sob manejo sustentável, para geração de energia.
401 *Ciência Florestal*, v. 27, n. 1, p. 117-127, 2017.
- 402 Brandão, M. L. S. M.; Iwata, B. F.; Alencar, G. S.; Carvalho, S. P.; Almeida, K. S.; Silva, C. M. A.; Rocha, I. L.;
403 Sousa, M. C. B. Biomassa aérea e NDVI em zona ecotonal cerrado-caatinga da Flona de Palmares, Altos,
404 Piauí, Brasil. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 5, p. 463-470, 2020.
- 405 Brito, A. C.; Paula, A.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Lima, R. B.; Souza, D. R. Diametric distribution modeling of
406 forest species in arboreal Caatinga vegetation, Brazil. *Rev. Ceres*, v. 69, n. 4, p. 464-469, 2022.
- 407 Brower, J. E.; Zar, J. H. **Field & laboratory methods for general ecology**. 2nd ed. Iowa: Wm. C. Brown
408 Publishers; 1984.
- 409 Caetano, R.; Silva, T. B.; Benfica, N. S.; Castro, D. R. Uso de índices espectrais na caracterização da cobertura
410 vegetal em região de Caatinga do Semiárido Baiano. *Rev. Geociênc. Nordeste*, v. 8, n. 2, p. 28-43, 2022.
- 411 Carvalho, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) -
412 Brasília, v. 1. 2003.
- 413 Carvalho, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) -
414 Brasília, v. 2. 2006.
- 415 Carvalho, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) -
416 Brasília, v. 3. 2008.
- 417 Carvalho, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) -
418 Brasília, v. 4. 2010.
- 419 Carvalho, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) -
420 Brasília, v. 5. 2014.
- 421 Coradin, L.; Camillo, J.; Pareyn, F. G. C. (Ed.). *Espécies nativas da flora brasileira de valor econômico atual ou
422 potencial: plantas para o futuro: região Nordeste*. Brasília, DF: MMA, 2018. (Série Biodiversidade; 51).
- 423 Dalla Lana, M.; Ferreira, R. L. C.; Silva, J. A. A.; Duda, G. P.; Brandão, C. F. L. S.; Silva, A. F. Biomass equations
424 for caatinga species. *Nativa, Sinop*, v. 6, n. 5, p. 517-525, 2018.
- 425 Dunn, O. J. Multiple comparisons using rank sums. *Technometrics*, v.6, n.3, p.241-252, 1964.
- 426 Enes, T.; Fonseca, T. F. Quantificação da biomassa em Pinhal Bravo recorrendo a fatores de conversão e expansão
427 (BCEF⁵). *Silva Lusitana*, v. 21, n. 1, p. 73-85, 2013.
- 428 Felfili, J. M.; Rezende, R. P. *Conceitos e métodos em fitossociologia*. Brasília: UnB, Departamento de Engenharia
429 Florestal. (Comunicações Técnicas Florestais). 68 p. 2003.
- 430 Fidalgo, O.; Bononi, V. L. R. **Manual Técnicas de coleta, preservação e herborização de material botânico**.
431 São Paulo: Instituto de Botânica, n. 4. p. 62, 1984.
- 432 Flora do Brasil. **Flora e Funga do Brasil**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2019, Disponível em:
433 <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Acesso em: 09 abr. 2024.
- 434 Hammer, Ø.; Harper, D. A. T.; Ryan, P. D. **Past**: Paleontological Statistics software package for education and data
435 analysis. *Paleontologia Electronica*, 4:9. 2001.
- 436 IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro, p.
437 271, 2012.
- 438 Kruskal, W. H., Wallis, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Am. Stat. Assoc.*, v.47, n. 260, p.
439 583-621, 1952.
- 440 LEBA. Leis Estaduais da Bahia. **Espécies imunes ao corte no Estado da Bahia. Resolução N° 1.009 de 06 de
441 dezembro de 1994, conforme o Conselho Estadual de Meio Ambiente – CEPRAM. Lei Ordinária de n°
442 13.908 de 29 de janeiro de 2018**. Disponível em: <https://leisestaduais.com.br/>. Acesso em: 10 fev. 2025.

- 443 Lima Júnior, C.; Accioly, L. J. O.; Giongo, V.; Lima, R. L. F. A.; Sampaio, E. V. S. B.; Menezes, R. S. C. Estimativa
444 de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Sci. For.**, v. 42, n.
445 102, p. 289-298, 2014.
- 446 Lima, R. B.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Paula, A.; Pereira, J. E. S.; Carvalho, F. F.; Gomes, S. H. M. Improving wood
447 volume predictions in dry tropical forest in the semi-arid Brazil. **Journal of Arid Land**, 2020.
- 448 Lorenzi, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova
449 Odessa: Plantarum, v. 2. 1998.
- 450 Lorenzi, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova
451 Odessa: Plantarum, v. 1, 3ª Ed. 2000.
- 452 Lorenzi, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova
453 Odessa: Plantarum, v. 3. 1ª Ed. 2009.
- 454 Luz, L. R.; Giongo, V.; Santos, A. M.; Lopes, R. J. C.; Lima Júnior, C. Biomass and vegetation index by remote
455 sensing in different caatinga forest areas. **Ciência Rural**, v. 52, n. 2, p. e20201104, 2022.
- 456 Maia, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. São Paulo: Leitura & Arte, 2004. 413p.
- 457 Marinho, L. C.; Costa, G. M.; Corrêa, M. M.; Freire, A. C.; Martins, F. R. S.; Peixoto, M. R.; Silva, S. R.; Soares
458 Filho, A. O.; Vitória, C.; Zappi, D. C.; Aona, L. Y. S. Lista de espécies de plantas vasculares da Floresta
459 Nacional Contendas do Sincorá. In: **Catálogo de Plantas das Unidades de Conservação do Brasil**. Jardim
460 Botânico do Rio de Janeiro. 2020. Disponível em: <https://catalogo-ucs-brasil.jbrj.gov.br>. Acesso em: 16 abr.
461 2024.
- 462 Marengo, J. A.; Torres, R. R.; Alves, L. M. Drought in Northeast Brazil-past, present, and future. **Theoretical and
463 Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017.
- 464 Menezes, R. S. C.; Sampaio, E. V. S. B. Agricultura sustentável no semiárido nordestino. In: OLIVEIRA, T. S. et
465 al. (Eds). Agricultura, sustentabilidade e o semiárido. Fortaleza: UFC; Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência
466 do Solo, 2000. p. 20-46.
- 467 Oliveira, V. R.; Ribeiro, A.; Drumond, M. A.; Porto, D. D.; Kiill, L. H. P.; Ferraz Filho, A. C. **A dinâmica da
468 vegetação de Caatinga na unidade experimental da Embrapa Semiárido em Petrolina, Pernambuco**.
469 Unsplash, F.; Dantas, J. Manejo Florestal na Caatinga 40 Anos de Experimentação. 2024. Ministério do Meio
470 Ambiente e Mudança do Clima. Disponível em:
471 <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1164987>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- 472 Paula, A.; Barreto-Garcia, P. A. B. **A dinâmica da vegetação de Caatinga na unidade experimental da Flona
473 Contendas do Sincorá-BA. Avaliação de resultados até 2018**. Unsplash, F.; Dantas, J. Manejo Florestal na
474 Caatinga 40 Anos de Experimentação. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. 2024. Disponível
475 em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1164987>. Acesso em: 14 mar. 2025.
- 476 Pereira, J. E. S.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Paula, A.; Lima, R. B.; Carvalho, F. F.; Nascimento, M. S.; Aragão, M.A.
477 Form quotient in estimating caatinga tree volume. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 40, p. 508-517, 2020.
- 478 Ribeiro, S. C.; Jacovine, L. A. G.; Soares, C. P. B.; Martins, S. V.; Nardelli, A. M. B.; Souza, A. L. Quantificação
479 de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma capoeira da zona da mata mineira. **Revista Árvore**,
480 v. 34, n. 3, p. 495-504, 2010.
- 481 RMFC. Rede de Manejo Florestal da Caatinga. Protocolo de medições de parcelas permanentes. Associação de
482 Plantas do Nordeste, 2005. Disponível em:
483 https://www.academia.edu/7891824/Protocolo_de_Medi%C3%A7%C3%B5es_da_Rede_de_Manejo_Flores
484 [tal_da_Caatinga](https://www.academia.edu/7891824/Protocolo_de_Medi%C3%A7%C3%B5es_da_Rede_de_Manejo_Flores). Acesso em: 9 abr. 2024.
- 485 Sá, I. B.; Silva, P. C. G. Semiárido brasileiro. In: **Semiárido Brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**.
486 (Org.). Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 147.
- 487 Sampaio, E. V. S. B.; Costa, T. L. Estoques e Fluxos de Carbono no Semi-Árido Nordeste: Estimativas
488 Preliminares. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, p. 1275-1291, 2011.
- 489 Sampaio, E. V. S. B.; Silva, G. C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. **Acta Botânica
490 Brasílica**, v. 19, n. 4, p. 935-943. 2005.

- 491 Sanquetta, C. R.; Bastos, A. S.; Ferronato, M. L.; Sanquetta, M. N. I.; Corte, A. P. D. Fatores de expansão e de
492 conversão de biomassa e razão de raízes em povoamentos de restauração florestal em Rondônia. **Enciclopédia**
493 **Biosfera**, v.16, n. 29, p. 871, 2019.
- 494 Santos, A. F. C.; Paula, A.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Corrêa, M. M.; Bombonatti, J. R. Natural regeneration
495 dynamics in caatinga tree submitted to forest management. **Floresta**, v. 53, n. 2, p. 232-241, 2023a.
- 496 Santos, H. K. V.; Lima, R. B.; Souza, R. L. F.; Cardoso, D.; Moonlight, P. W.; Silva, T. T.; Oliveira, C. P.; Alves
497 Júnior, F. T.; Veenendaal, E.; Queiroz, L. P.; Rodrigues, P. M. S.; Santos, R. M.; Sarkinen, T.; Paula, A.;
498 Barreto-Garcia, P. A. B.; Pennington, T.; Phillips, O. L. Spatial distribution of aboveground biomass stock in
499 tropical dry forest in Brazil. **IForest**, v. 16, n. 2, p. 116–126, 2023b.
- 500 Santos, R. C.; Castro, R. V. O.; Carneiro, A. C. O.; Castro, A. F. N. M.; Pimenta, A. S.; Pinto, E. M.; Marinho, I.
501 V. Estoques de volume, biomassa e carbono na madeira de espécies da Caatinga em Caicó, RN. **Pesq. flor.**
502 **bras.**, v. 36, n. 85, p. 1-7, 2016.
- 503 Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n.
504 3/4, p. 591-611, 1965.
- 505 Shepherd, G. J. **Programa Fitopac versão 2.1**. Departamento de Botânica, Universidade Estadual de Campinas,
506 96p. 2010.
- 507 Silva, L. B.; Santos, F. A. R.; Gasson, P.; Cutler, D. Estudo comparativo da madeira de *Mimosa ophthalmocentra*
508 Mart. ex Benth e *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (Fabaceae-Mimosoideae) na caatinga nordestina. **Acta bot.**
509 **bras.**, v. 25, n. 2. p. 301-314, 2011.
- 510 Silva, A. G.; Vilar, L. O.; Vilar, V. O.; Coelho, F. P.; Acioli, N. R. S.; Ramos, R. B. G. A.; Moreira, J. G.; Diores,
511 T. R.; Silva, D. F.; Cruz, M. S.; Moura, R. G. O Manejo Florestal Sustentável da Caatinga. **Revista Ibero-**
512 **Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 7, n. 5, 2021.
- 513 Souza, D. D. A Caatinga. In: Souza, D. D. (Ed.). **Adaptações de plantas da caatinga**. São Paulo, SP: Oficina de
514 textos, 2020. v. 1, cap. 1, p. 10-22.
- 515 Souza, D. D.; Cavalcante, N. B. Biometria de frutos e sementes de *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill.
516 (Euphorbiaceae). **Acta Biológica Catarinense**, v. 6, n. 2, p. 115-122, 2019.
- 517 Souza, M. P.; Alves, A. R.; Bakke, I. A.; Lopes, J. A.; Santos, W. S.; Fernando, E. M. P. Banco de sementes do solo
518 de caatinga submetida a plano de manejo florestal sustentável em Cuité-PB. **Scientia Forestalis**, 49(130),
519 e3494. 2021.
- 520 **The Plant List**. Version 1. Published on the Internet. 2019. Disponível em: <http://www.theplantlist.org/>. Acesso
521 em: 16 abr. 2024.
- 522 Tucker, H. **A short graduate course in nonparametric statistical inference**, University of California. 1984.
- 523 Virgens, A. P.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Paula, A.; Carvalho, F. F.; Aragão, M. D. A.; Monroe, P. H. M. Biomassa
524 de espécies florestais em área de caatinga arbórea. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 555-561,
525 2017.
- 526 Wadsworth, M. W., **Handbook of Statistical Methods for Engineers and Scientists**, McGraw-Hill Publishing
527 Company. 1990.
- 528 Zanne, A. E.; Lopez-Gonzalez, G.; Coomes, D. A.; Ilic, J.; Jansen, S.; Lewis, S. L.; Miller, R. B.; Swenson, N. G.;
529 Wiemann, M. C.; Chave, J. **Global wood density database**. Dryad. 2009. Disponível em:
530 <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>. Acesso em: 24 abr. 2024.

ARTIGO II

**ESTIMATIVA DE VOLUME E BIOMASSA FLORESTAL EM ÁREA DE
CAATINGA MANEJADA A PARTIR DE ÍNDICES ESPECTRAIS**

*Manuscrito nas normas da Revista de Geociências do
Nordeste (REGNE): ISSN: 2447-3359*

Estimativa de Volume e Biomassa Florestal em Área de Caatinga Manejada a Partir de Índices Espectrais

Estimation of Forest Volume and Biomass in a Managed Caatinga Area Based on spectral Indices

Resumo: Este trabalho teve como objetivo estimar o volume e a biomassa florestal em área de Caatinga Manejada a partir de diferentes Índices Espectrais (IE) utilizando o Google Earth Engine durante o período seco e chuvoso na Floresta Nacional de Contendas do Sincorá. O experimento foi composto de 48 parcelas fixas de 20 m x 20 m, divididas igualmente em três unidades amostrais. Os dados foram obtidos por meio de inventário florestal em 2023. Os Índices Espectrais foram selecionados conforme a revisão de literatura (16), utilizando imagem de satélite e drone. Três modelos de regressão foram utilizados, sendo: o Modelo Linear Generalizado (GLM), o Modelo Aditivo Generalizado (GAM) e o Random Forest (RF). As análises estatísticas foram realizadas pelo programa R studio 4.4.2 e Past 4.02. O RF apresentou os melhores resultados, evidenciando não haver diferença estatística na estimativa de volume e biomassa florestal entre os períodos (seco e chuvoso), entretanto os IE significativos para o período seco diferem daqueles do período chuvoso. A imagem de drone discriminou melhor a distribuição do volume e da biomassa florestal, devido a sua maior resolução espacial. Para a imagem de satélite, o ExR e o NDRE se destacaram na estimativa das variáveis para o período seco, ao passo que NIRG, GNDVI e CHI se sobressaíram durante o período chuvoso. Para a imagem de drone, o TGI e o ExR foram superiores na estimativa de volume e biomassa no período seco. Para o período chuvoso, ExG e GLI promoveram os melhores resultados para o volume, e VARIG e ExR, para a biomassa.

Palavras-chave: Aprendizado de máquina. Floresta seca. Google Earth Engine.

Abstract: This study aimed to estimate forest volume and biomass in a Managed Caatinga area using different spectral indices using Google Earth Engine (GEE) during the dry and rainy seasons in the Contendas do Sincorá National Forest. The experiment consisted of 48 fixed plots of 20 m x 20 m, equally divided into three sampling units. Data were obtained through a forest inventory in 2023. Vegetation Indices (VI) were selected according to the literature review (16), using satellite and drone images. Three regression models were used: the Generalized Linear Model (GLM), the Generalized Additive Model (GAM) and the Random Forest (RF). Statistical analyses were performed using R studio 4.4.2 and Past 4.02. The RF presented the best results, showing no statistical difference in the estimation of forest volume and biomass between the periods (dry and rainy); however, the significant IE for the dry period differed from those of the rainy period. The drone image better discriminated the distribution of forest volume and biomass, due to its greater spatial resolution. For the satellite image, ExR and NDRE stood out in the estimation of the variables for the dry period, while NIRG, GNDVI and CHI stood out during the rainy period. For the drone image, TGI and ExR were superior in the estimation of volume and biomass in the dry period. For the rainy period, ExG and GLI promoted the best results for volume, and VARIG and ExR for biomass.

Keywords: Machine learning. Volume Conversion. Dry forest. Google Earth Engine.

1. Introdução

A estimativa de parâmetros florestais como volume e biomassa florestal acima do solo constitui ferramenta importante de monitoramento da vegetação, bem como proporciona a compreensão de ciclos vitais essenciais à manutenção da vida no planeta. Nesse sentido, as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (SDTF, *Seasonally Dry Tropical Forests*) ganham cada dia mais notoriedade no meio científico em razão do poder de resposta que esses ambientes podem oferecer no cenário de alterações climáticas globais. As SDTF constituem cerca de 42% do total de florestas tropicais terrestres (Carvalho *et al.*, 2023).

O domínio fitogeográfico da Caatinga, localizada no Nordeste brasileiro, pertence às SDTF e apresenta uma flora tropical rica em plantas suculentas e espinhosas, que se caracterizam por possuir folhas pequenas, forma de vida xerofítica, ocorrendo em regiões com solo fértil e precipitação caracterizada como bimodal, marcada por dois picos climáticos, típicos de zonas tropicais e subtropicais (Murphy; Lugo, 1986; Queiroz *et al.*, 2017). Ao longo do seu ciclo evolutivo, muitas plantas desenvolveram adaptações para sobreviver às adversidades decorrentes da distribuição pluviométrica irregular e das secas intensas e frequentes, que ocasionam a alteração do clima semiárido para árido em alguns locais (Fernandes; Queiroz, 2018; Santos *et al.*, 2020; Barbosa, 2023).

Cerca de 23% do total de espécies catalogadas das SDTF da Caatinga são endêmicos (Fernandes; Queiroz, 2018), ou seja, não ocorrem em nenhuma outra região do planeta. Além disso, as espécies mais próximas evolutivamente estão em outras florestas secas da América do Sul (Tabarelli *et al.*, 2018). Apesar dessa rica biodiversidade, a Caatinga sofre com a carência de pesquisas científicas, políticas públicas e incentivos ambientais, potencializada por estereótipos negativos, caça ilegal, desmatamento e queimadas para expansão de novas áreas para agricultura, pastagem e pecuária

Essas práticas afetam diretamente os processos dinâmicos das florestas e modificam as paisagens ao diminuir os estoques de volume e biomassa florestal, o que pode causar perdas irreparáveis. Uma das alternativas para monitorar e mitigar tamanhos impactos é a utilização do Sensoriamento Remoto (SR) e seus produtos. Caetano *et al.* (2022) enfatizaram que o uso do SR tem se destacado devido à possibilidade de obter respostas dos alvos sem

63 estar em contato físico com os mesmos. Em outras palavras, é possível estudar uma floresta, acompanhar a
64 produção de biomassa e monitorar seu crescimento por meio da aplicação de técnicas remotas, ou seja, por meio
65 de sensores diversos, em diferentes níveis (terrestre, suborbital e orbital), com distintas resoluções espaciais e
66 temporais, associados com variados comprimentos de onda, e relacioná-los com os elementos estruturais da
67 vegetação.

68 Ao correlacionar diferentes comprimentos de onda (bandas espectrais) é possível avaliar o comportamento e
69 até estimar parâmetros da vegetação, utilizando técnicas de processamento de imagens chamadas Índices
70 Espectrais (IE). Essas técnicas exploram os detalhes presentes nas cenas, sejam elas provenientes de satélites ou
71 drones (Silva Júnior *et al.*, 2021; Galvincto *et al.*, 2022; Caetano *et al.*, 2022). Um grande impasse no contexto do
72 semiárido é a carência de estações de monitoramento com boa distribuição espacial (El Kenawy *et al.*, 2019),
73 tornando as pesquisas provenientes das geotecnologias ainda mais relevantes para a compreensão das florestas.

74 A aplicação dessas técnicas de processamento de imagens possibilita determinar modelos matemáticos que
75 permitem entender o comportamento de variáveis da floresta e, com isso, gerir de maneira assertiva os processos
76 de tomada da decisão, contribuindo para ações de conservação e manejo florestal. Ainda, para análise de dados
77 espaciais é interessante combinar essas técnicas remotas com métodos que utilizam *machine learning*
78 (aprendizagem de máquina), tendo em vista o potencial de investigação de grande volume de dados e variáveis. O
79 Random Forest (RF), por exemplo, é um método de classificação da vegetação por meio do *machine learning*,
80 baseando-se em árvores de decisão, sendo necessária apenas a escolha das amostras para representar a classe-alvo
81 de modo que seja mais próximo da realidade possível (Ganem *et al.*, 2020). Trabalho realizado por Cardoso *et al.*
82 (2021) utilizou o RF para mapear e classificar a vegetação da bacia do rio Taperoá, Paraíba, por meio de Índices
83 Espectrais, conseguindo uma acurácia de 79%, bem como foi possível definir seis classes de vegetação, que
84 revelaram elevada porcentagem de degradação da área da bacia.

85 Entretanto, Silva Júnior *et al.* (2021) enfatizaram que os estudos com aplicação de Índices Espectrais para o
86 bioma Caatinga em específico ainda são incipientes, devendo-se realizar pesquisas voltadas principalmente à
87 modelagem e validações de novas metodologias. Nesse sentido, quantificar parâmetros florestais como o volume
88 e a biomassa florestal tornou-se essencial para compreender e traçar estratégias de gestão eficazes no cenário de
89 mudanças climáticas que enfrentamos. Quando aliada ao SR, os resultados têm se mostrado promissores,
90 assemelhando-se àqueles obtidos diretamente no campo. Assim, este trabalho teve como objetivo estimar o volume
91 e a biomassa florestal em área de Caatinga Manejada a partir de diferentes Índices Espectrais utilizando o GEE.
92

93 2. Metodologia

94 2.1 Caracterização da área de estudo

95 O estudo foi desenvolvido em uma área experimental localizada na Floresta Nacional de Contendas do Sincorá
96 (FLONA), cujo território faz parte da unidade de conservação de uso sustentável, com área de 11.215,93 ha,
97 localizada no município de Contendas do Sincorá no estado da Bahia, Brasil (coordenadas geográficas: 13° 55'
98 21" S e 41° 06' 57" W (Figura 1).

99

100

101

102

103

104

105

106

107

108

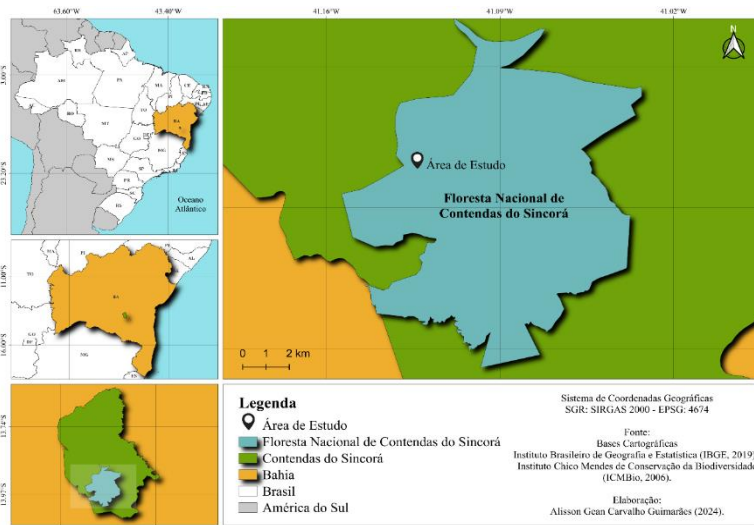
109

110

111

112

113



114

115

116

117

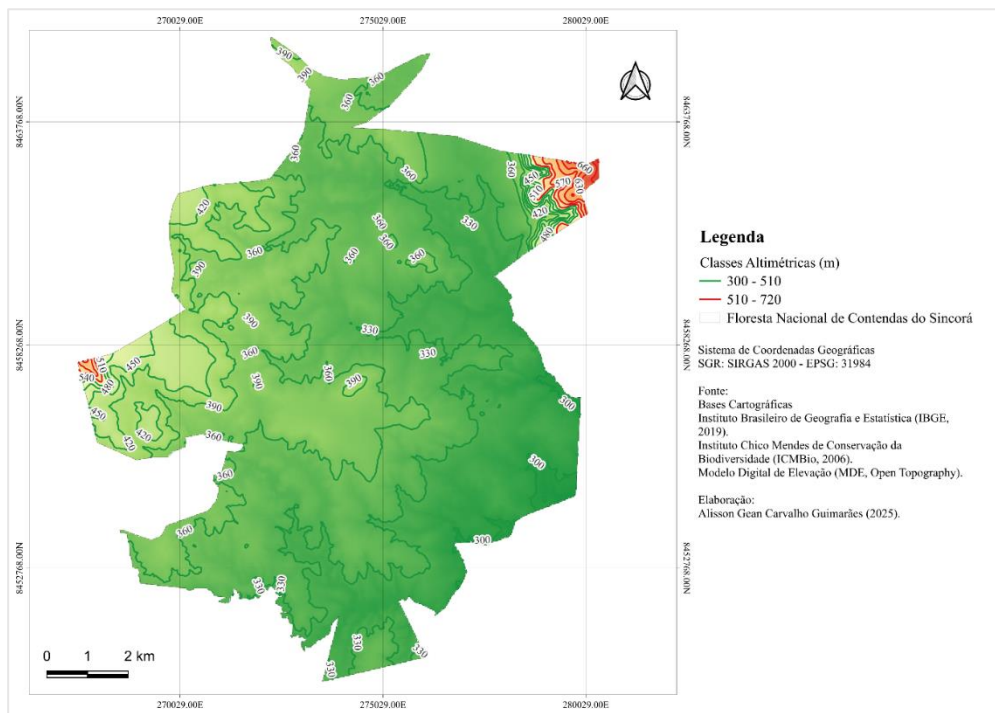
118

Figura 1 – Localização Geográfica da Área Experimental na Floresta Nacional (FLONA) no Município de Contendas do Sincorá, Bahia. Fonte: autor (2024).

A região possui clima semiárido (tipo BSwH) de acordo com a Classificação de Köppen, apresentando clima quente, com temperatura média anual de 23 °C e precipitação anual em torno de 600 mm, concentrada no verão,

119 de novembro a abril, ao passo que os meses de maio a outubro marcam a estação seca. A altitude varia entre 295
 120 e 380 m (Figura 2), e os solos são classificados como argissolos (Marinho *et al.*, 2020).

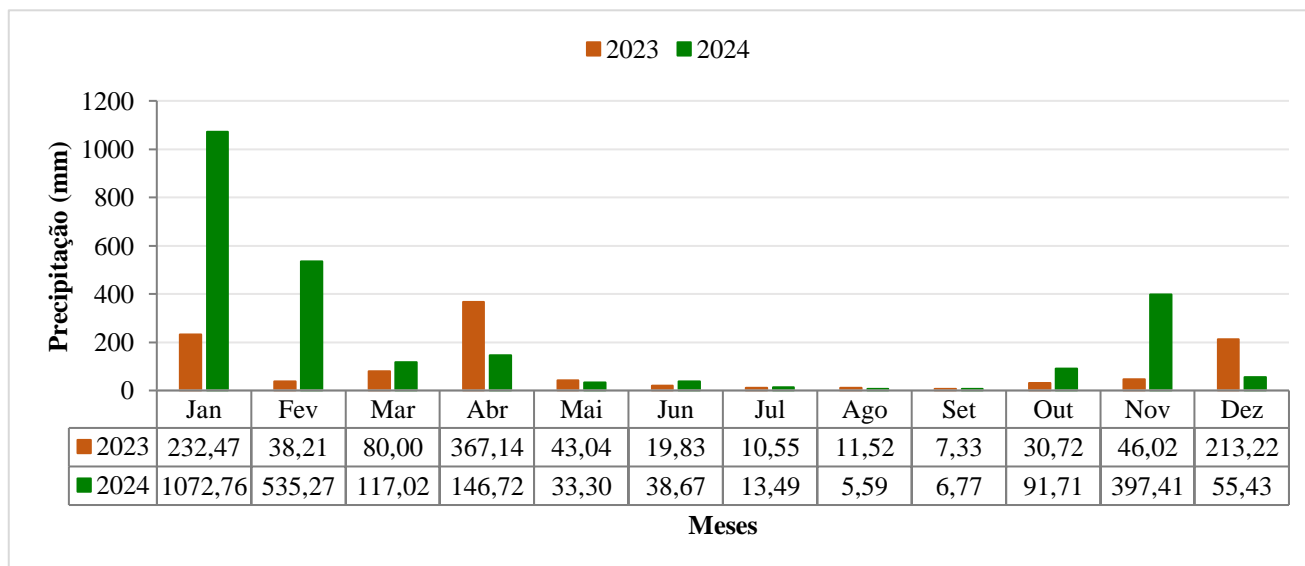
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144



145 *Figura 2 – Mapa Altimétrico da Floresta Nacional de Contendas do Sincorá, Bahia. Fonte: autor (2025).*

146
147
148
149
150
151

Na Figura 3, observa-se a precipitação mensal para os anos de 2023 e 2024 para a FLONA, obtida pela coleção *Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS)* no GEE, cujos dados diários sobre a precipitação estão disponíveis desde 1981 até os dias atuais, com resolução espacial de 5566 m (5,6 km) (Funk *et al.*, 2015).



152 *Figura 3 – Precipitação para área da FLONA nos anos de 2023 e 2024 a partir da coleção CHIRPS no*
 153 *Município de Contendas do Sincorá, Bahia. Fonte: Dados da pesquisa (2025).*

154
155
156
157
158
159

Sua vegetação é classificada como Savana-Estépica Florestada, sendo este subgrupo estruturado basicamente em dois estratos: I) superior, com predomínio de plantas caducifólias mais ou menos adensadas por troncos grossos bem esgalhados, apresentando espinhos ou acúleos; e II) inferior, gramíneo-lenhoso, geralmente descontínuo e de pouca expressão fisionômica (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2012).

160 **2.2 Croqui experimental**

161

162

163

164

165

166

167

168

169

170

171

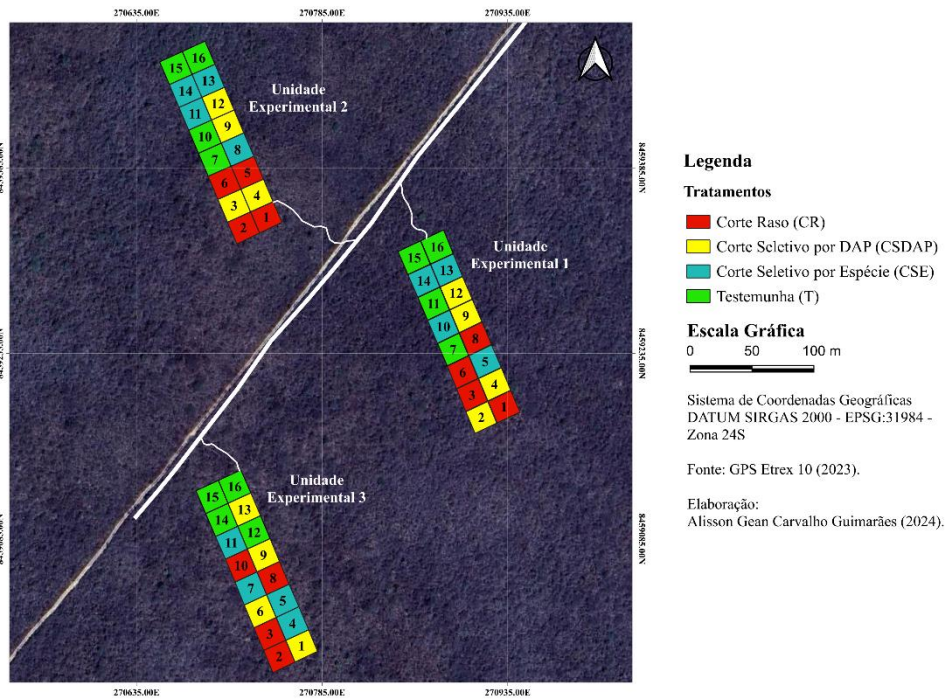
172

173

174

175

A área experimental foi composta por 48 parcelas fixas de 20 m x 20 m, divididas igualmente em três unidades experimentais, nas quais todas receberam quatro tratamentos, com quatro repetições cada (Figura 4). Os tratamentos foram: testemunha (T), que consiste na Caatinga não manejada; corte raso (CR): com remoção de todas as árvores e arbustos, independentemente do tamanho ou espécie (redução de 100% da área basal); corte seletivo por diâmetro mínimo (CSDAP): corte de todas as árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) maior ou igual a 5 cm (redução de 60 % da área basal); e corte seletivo por espécie (CES): corte de três espécies (*Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B. Gillet, *Jatropha molissima* (Pohl) Baill. e *Pseudobombax simplicifolium* A. Robyns) selecionadas devido à sua densidade populacional e por serem espécies com potencial de uso para diversos fins, como: artesanato, marcenaria, fabricação de móveis e em obras de entalhe: caixotaria, objetos leves e utensílios caseiros (Carvalho, 2008; Lorenzi, 1998) (redução de 15% da área basal). Com relação à espécie *J. molissima*, endêmica do bioma Caatinga, além de ser importante no contexto do semiárido, apresenta usos na medicina tradicional e industrial, bem como é indicada para recuperação de áreas degradadas (Souza; Cavalcante, 2019).



176

177

178

179

Figura 4 – Croqui e localização das unidades experimentais na Floresta Nacional (FLONA), em Contendas do Sincorá, Bahia. Fonte: autor (2024).

180

181

182

183

184

2.3 Coleta dos dados e obtenção do volume e biomassa florestal

185

186

187

188

189

190

Os dados foram obtidos por meio do Inventário Florestal Contínuo (IFC), em 2023, durante o qual foram identificadas as árvores e mensurados os seguintes parâmetros dendrológicos: Diâmetro ao Nível da Base (DNB), Diâmetro à Altura do Peito (DAP) de todos os indivíduos que apresentaram DAP igual ou superior a 5,0 cm com o auxílio de uma suta, e a altura (H). Os indivíduos que atingiram o nível mínimo predefinido de inclusão foram considerados como “ingresso”.

191

192

193

194

195

196

197

A partir dessas informações foi obtido o volume real (considerando a forma afunilada de crescimento) das espécies utilizando o quociente de forma (0,81), validado para área de estudo no trabalho de Pereira *et al.* (2020). Posteriormente, obteve-se a biomassa florestal por meio da densidade básica de cada espécie. Vale mencionar que cinco indivíduos com DAP superior a 35 cm foram considerados *outliers* e, portanto, removidos do banco de dados para aplicação dos modelos.

198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217

2.4 Aquisição e processamento das imagens

Para a estimativa dos Índices Espectrais (IE), utilizaram-se imagens de drone organizadas em um ortomosaico, tanto para o período seco (maio a outubro) como para o período chuvoso (novembro a abril). O drone utilizado foi o Phantom 4 advanced (R: banda b1; G: banda b2; B: banda b3), marca DJI, resolução espacial de 3 cm/pixel (3 cm x 3 cm no solo), sensor: 1” CMOS, 20MP, altura de voo de 100 m, com ângulo de 90°, velocidade de voo de 9 m/s, com sobreposição de 80% na direção frontal e 70% na direção lateral. O voo foi realizado entre o intervalo de 10:00 h a.m. às 12:00 h p.m., de maneira a minimizar a interferência das sombras dos alvos. O voo referente ao período seco ocorreu no dia sete de setembro de 2023, de modo que do período chuvoso, no dia vinte e nove de fevereiro de 2024.

Ademais, foram utilizadas imagens de satélite (Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A) adquiridas por meio da plataforma do GEE (Quadro 1) (European Space Agency, 2025), que estão disponíveis desde vinte e oito de março de 2017 até os dias atuais. O Sentinel-2 é uma missão de imagem multiespectral, de alta resolução e de ampla faixa, que apoia os estudos de monitorização terrestre do Copernicus, incluindo a monitorização da vegetação, do solo e da cobertura hídrica, bem como a observação de vias navegáveis interiores e zonas costeiras.

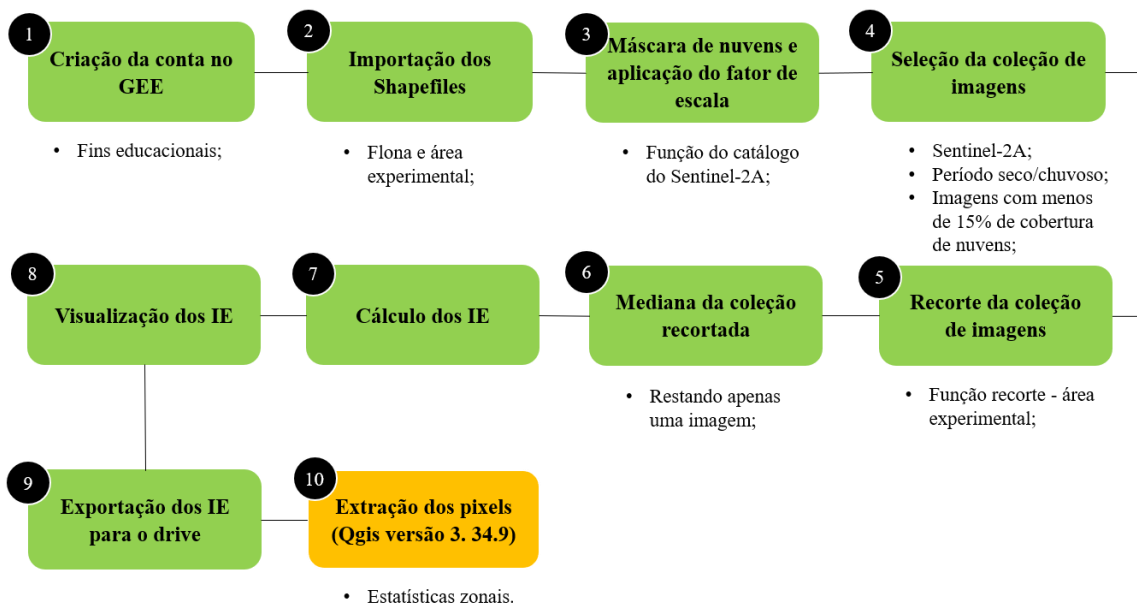
Quadro 1 – Características das bandas utilizadas do Satélite Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A.

Nome	Escala	Resolução espacial (m)	Comprimento de onda	Descrição
B2	0,0001	10	496,6 nm (S2A) / 492,1 nm (S2B)	Blue
B3	0,0001	10	560 nm (S2A) / 559 nm (S2B)	Green
B4	0,0001	10	664,5 nm (S2A) / 665 nm (S2B)	Red
B5	0,0001	20	703,9 nm (S2A) / 703,8 nm (S2B)	Red Edge 1
B8	0,0001	10	835,1 nm (S2A) / 833 nm (S2B)	NIR

Fonte: European Space Agency (2025).

218
219
220
221
222
223

O processamento das imagens foi executado por meio da programação em linguagem JavaScript dentro da plataforma GEE. Esta é uma plataforma de análise de imagens de satélite com infraestrutura computacional e conjunto de dados de acesso aberto, apresentando potencial de alto desempenho para o processamento de dados geoespaciais muito grandes utilizando linguagem JavaScript (Gorelick *et al.*, 2017). No fluxograma a seguir, pode ser visualizada a estruturação do código no ambiente de programação do GEE (Figura 5).



224
225
226

Figura 5 – Fluxograma e estruturação do código no Code Editor do GEE.
Fonte: Autor (2024).

227 **2.5 Índices Espectrais (IE)**
 228

229 Os Índices Espectrais foram selecionados conforme a revisão de literatura com o intuito de testar diferentes
 230 índices e verificar suas respostas e associações na estimativa de volume e biomassa florestal para ambos os
 231 métodos de aquisição de imagens. Para a imagem do Sentinel, aplicaram-se 16 Índices Espectrais (NDVI, EVI,
 232 EVI2, SAVI, GNDVI, NDRE, NGRDI, NIRG, RI, SR, ExR, GLI, VARIG, CHI, TGI e ExG) e, para o ortomosaico,
 233 sete índices (ExG, ExR, GLI, NGRDI, RI, TGI e, VARIG), sendo alguns deles comuns entre os dois métodos
 234 (Tabela 1).

235 *Tabela 1 – Índices Espectrais utilizados para estimativa de volume e biomassa florestal. Em que: R_{NIR} =*
 236 *Reflectância na banda do Infravermelho Próximo; R_{RED} = Reflectância na banda do vermelho; R_{GREEN} =*
 237 *Reflectância na banda do verde; R_{BLUE} = Reflectância na banda do azul; $R_{RED\ EDGE\ 1}$ = Reflectância na banda*
 238 *borda do vermelho; L = Fator de ajuste para influência do solo (0,5); G = Fator de ganho (2,5); $C1$ e $C2$ =*
 239 *Coefficientes de correção dos efeitos atmosféricos (EVI, $C1 = 6 (R_{RED})$ e $C2 = 7,5 (R_{BLUE})$), para (EVI2, $C1 = 2,4$*
 240 *(R_{RED})).*

Índice de Vegetação (IV)	Sigla	Tipo*	Fórmula	Referências Bibliográficas
Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	NDVI	NIR	$(R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$	Rouse <i>et al.</i> (1973)
Índice de Vegetação Ajustado ao Solo	SAVI	NIR	$(1 + L) * (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED} + L)$	Huete (1988)
Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada ao Verde	GNDVI	NIR	$(R_{NIR} - R_{GREEN}) / (R_{NIR} + R_{GREEN})$	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
Índice de Vegetação do Infravermelho e Verde	NIRG	NIR	R_{NIR} / R_{GREEN}	Gitelson & Merzlyak (1997)
Índice Vegetação da Razão Simples (SR)	SR	NIR	R_{NIR} / R_{RED}	Jordan (1969)
Índice de Vegetação Melhorada	EVI	NIR	$G * (R_{NIR} - R_{RED}) / (1 + R_{NIR} + C1 * R_{RED} - C2 * R_{BLUE})$	Justice <i>et al.</i> (1998)
Índice de Vegetação Melhorada (sem a banda do azul)	EVI2	NIR	$G * (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + (C1 * R_{RED}) + 1)$	Jiang <i>et al.</i> (2008)
Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada à Transição do Vermelho (<i>red edge</i>)	NDRE	NIR	$(R_{NIR} - R_{EDGE}) / (R_{NIR} + R_{EDGE})$	Gitelson & Merzlyak (1994)
Índice Verde/Vermelho por Diferença Normalizada	NGRDI	RGB	$R_{GREEN} - R_{RED} / R_{GREEN} + R_{RED}$	Tucker (1979)
Índice de Vermelhidão (Redness Index)	RI	RGB	$R_{RED} - R_{GREEN} / R_{RED} + R_{GREEN}$	Escadafal e Huete (1991)
Índice de Verde em Excesso (<i>Excess Green Index</i>)	ExG	RGB	$2 * R_{GREEN} - R_{RED} - R_{BLUE}$	Woebbecke <i>et al.</i> (1995)
Índice Vegetativo de Vermelho em Excesso (<i>Excess Red Vegetative Index</i>)	ExR	RGB	$1,4 * R_{RED} - R_{GREEN}$	Meyer <i>et al.</i> (1998)
Índice de Folha Verde (<i>Green Leaf Index</i>)	GLI	RGB	$(2 * R_{GREEN} - R_{RED} - R_{BLUE}) / (2 * R_{GREEN} + R_{RED} + R_{BLUE})$	Louhaichi <i>et al.</i> (2001)

Índice Triangular Verde (Triangular Greenness Index)	TGI	RGB	$R_{GREEN} - 0,39 * R_{RED} - 0,61 * R_{BLUE}$	Hunt <i>et al.</i> (2011)
Índice de Clorofila Verde (Green Chlorophyll Index)	CHI	RGB	$(R_{NIR} / R_{GREEN}) - 1$	Gitelson <i>et al.</i> (2005)
Índice Visível de Resistência Atmosférica (Visible Atmospherically Resistant Index)	VARIG	RGB	$(R_{GREEN} - R_{RED}) / (R_{GREEN} + R_{RED} - R_{BLUE})$	Gitelson <i>et al.</i> (2002)

241 *RGB = Índices que possuem as faixas RGB (vermelho, verde, azul); NIR = Índices que possuem relação com o
242 infravermelho próximo;

243 2.6 Ajuste dos Modelos Preditivos

244
245 Para estimar a biomassa da Caatinga na FLONA Sincorá, foram ajustados três modelos distintos: um modelo
246 linear generalizado (GLM), um modelo aditivo generalizado (GAM) e um modelo baseado em aprendizado de
247 máquina, Random Forest (RF). A seleção dessas abordagens permitiu comparar técnicas paramétricas e não-
248 paramétricas no processo de modelagem da biomassa. Todos os modelos foram ajustados na linguagem R,
249 utilizando os pacotes *stats*, *mgcv*, *randomForest* e *caret*.

250 2.6.1 Modelo Linear Generalizado (GLM)

251
252 O modelo GLM foi ajustado utilizando distribuição normal (gaussiana) para modelar a biomassa em função
253 das variáveis espectrais, assumindo uma relação linear entre as variáveis predictoras e a resposta. O modelo foi
254 especificado da seguinte forma:

$$255 Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon$$

256
257 onde Y_i representa a biomassa estimada, X_i são os Índices Espectrais, β_i são os coeficientes estimados e ε é o termo
258 de erro. O modelo foi ajustado utilizando a função *glm()* do pacote *stats* no R.

259 2.6.2 Modelo Aditivo Generalizado (GAM)

260
261 O modelo GAM foi empregado para capturar padrões não-lineares na relação entre biomassa e Índices
262 Espectrais. Diferentemente do GLM, o GAM incorpora funções suavizadas $s(X)$, permitindo maior flexibilidade
263 na modelagem:

$$264 Y_i = \beta_0 + s(X_1) + s(X_2) + \dots + s(X_n) + \varepsilon$$

265
266 As funções suavizadas foram ajustadas utilizando *splines* cúbicos e o modelo foi implementado com a função
267 *gam()* do pacote *mgcv* no R.

268 2.6.3 Modelo Random Forest (RF)

269
270 O modelo Random Forest foi utilizado como abordagem baseada em árvores de decisão para capturar relações
271 complexas e interações entre variáveis predictoras. O modelo foi treinado com 500 árvores e critério de seleção de
272 variáveis baseado na minimização do erro quadrático médio. O modelo foi ajustado utilizando a função
273 *randomForest()* do pacote *randomForest* no R. A importância das variáveis foi analisada utilizando o gráfico
274 *varImpPlot()*, e gráficos de resposta parcial foram gerados para interpretar o impacto dos preditores na biomassa.

275 2.7 Avaliação e Seleção do Melhor Modelo

276
277 A seleção do melhor modelo foi realizada por meio da validação cruzada e comparação de métricas estatísticas,
278 incluindo:

- 282 • **Erro quadrático médio (RMSE):** Avalia a precisão das previsões.

$$283 RMSE = \sqrt{(1/n \sum (y_i - \hat{y}_i)^2)}$$

- **Coefficiente de determinação (R²):** Mede a proporção da variação explicada pelo modelo.

$$R^2 = 1 - (\sum(y_i - \hat{y}_i)^2) / (\sum(y_i - \bar{y})^2)$$

- **Viés (Bias):** Mede a tendência sistemática do modelo em superestimar ou subestimar a biomassa.

$$\text{Bias} = (1/n) \sum(\hat{y}_i - y_i)$$

Os valores dessas métricas foram comparados entre os modelos para selecionar a abordagem mais adequada para a espacialização da biomassa na FLONA Sincorá. As métricas foram calculadas utilizando as funções *RMSE()* e *R2()* do pacote *caret* no R.

2.8 Geração de mapas de volume e biomassa florestal

O modelo com melhor desempenho foi utilizado para gerar mapas de volume e biomassa na FLONA Sincorá, aplicando as equações estimadas a um conjunto de dados espaciais. A espacialização foi realizada utilizando técnicas de interpolação e predição espacial, gerando mapas contínuos da biomassa da Caatinga.

Para comparar os valores observados e estimados a partir da espacialização aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk para testar a normalidade da distribuição dos dados, ao passo que a homogeneidade de variâncias foi analisada pelo teste de Levene (Shapiro & Wilk, 1965). Como os valores não atenderam aos critérios ora citados, utilizou-se o teste não-paramétrico de Mann-Whitney, o qual é utilizado para determinar se as observações de uma população tendem a ser maiores ou menores que outra população (Tucker, 1984; Wadsworth, 1990). Essas análises foram executadas por meio do programa Past 4.02 (Hammer *et al.*, 2001) a 5% de significância. Quando o valor de p foi menor que 0,05, não houve diferença entre os dados, quando p maior que 0,05, houve diferença entre os mesmos.

3. Resultados

3.1 Período seco (imagem de satélite)

Conforme a Tabela 2, os resultados do RF tanto para estimativa de volume como para a biomassa florestal foram superiores aos demais modelos de regressão utilizados. Para o volume, 82% da sua variação nas parcelas foram explicados pelo modelo, de modo que para a biomassa florestal obtiveram-se 89%.

Tabela 2 – Resultados dos modelos utilizados, no período seco, para estimativa de volume e biomassa florestal a partir dos Índices Espectrais para as 48 parcelas. Em que: RMSE = Raiz Quadrada do Erro Médio; R2 = Coeficiente de Determinação; Bias = Viés/erro sistemático.

Modelo	Volume			Biomassa Florestal		
	RMSE	R2	Bias	RMSE	R2	Bias
GLM	0,47	0,56	-4,62E-03	393,76	0,49	-3,63E+00
GAM	0,34	0,78	-1,74E-05	254,75	0,79	-7,13E-02
RF	0,34	0,91	-5,54E+03	268,01	0,89	-1,09E+07

Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Na Figura 6, visualiza-se a análise de regressão pelo RF para todos os IE (A e C); e aqueles IE que mais contribuíram para a estimativa de volume e biomassa florestal (B e D). O ExR se destacou na predição do volume, e o NDRE foi mais importante para a biomassa florestal.

333
 334
 335
 336
 337
 338
 339
 340
 341
 342
 343
 344
 345
 346
 347
 348
 349
 350

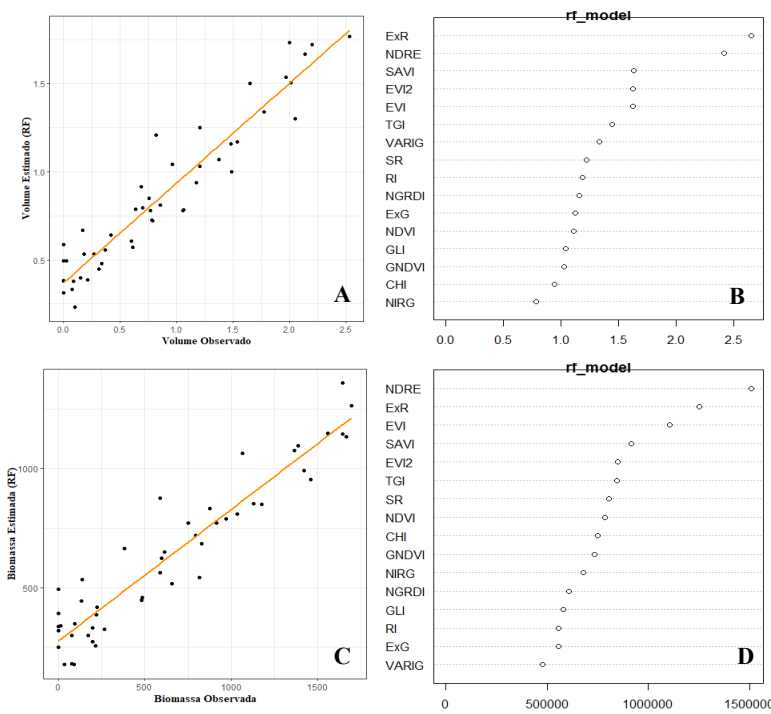


Figura 6 – Análise de regressão pelo RF para todos os 16 índices (A e C); IE que mais contribuíram para a estimativa do volume e da biomassa florestal (B e D) durante o período seco via imagem de satélite. Fonte: Dados da pesquisa (2024).

351
 352
 353
 354
 355
 356
 357

As regressões lineares a partir do RF na Figura 5 A e C evidenciam que o modelo conseguiu captar a maior parte da variação referente ao volume e à biomassa florestal. Dentre os 16 IE ExR e NDRE foram os mais evidentes na estimativa dos parâmetros, tendo em vista que, quanto mais à direita estiver o círculo referente ao IE, maior é sua contribuição. Posteriormente, ExR e NDRE foram especializados dentro das unidades (estimar o volume e a biomassa florestal). Na Tabela 3, apresentam-se os valores observados e estimados pelo NDRE pelo RF.

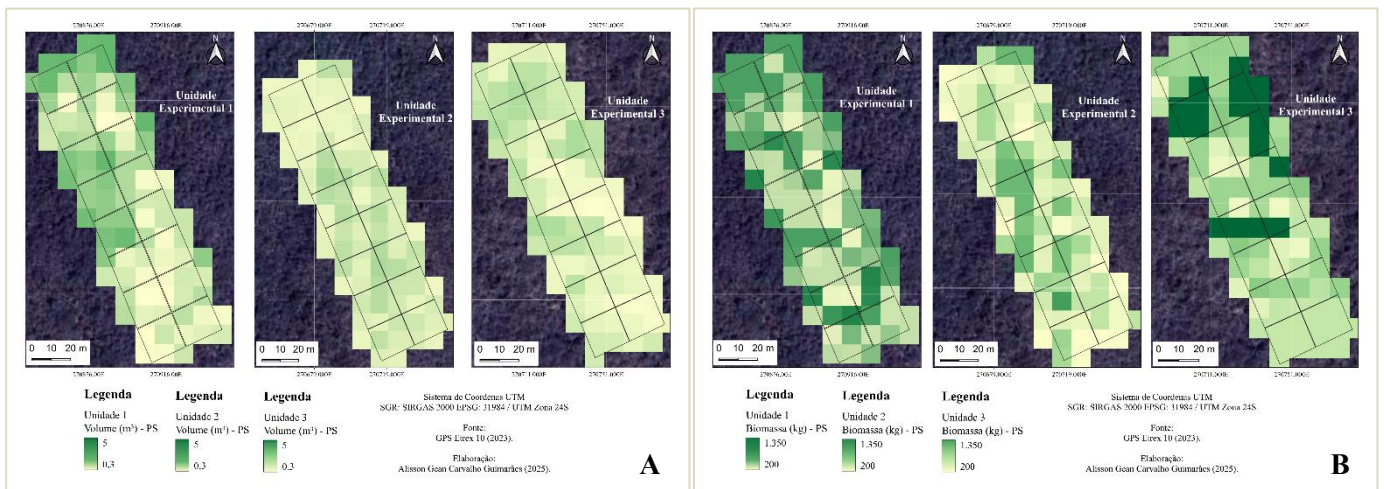
Tabela 3 – Resultados da espacialização pelo RF utilizando o ExR (volume) e o NDRE (Biomassa Florestal) para as 48 parcelas durante o período seco via imagem de satélite.

Unidades	Volume Observado (m³)	Volume Estimado (m³)	Biomassa Observada (kg)	Biomassa Estimada (kg)
Unidade 1	13,96	13,96	9115,17	7709,19
Unidade 2	10,43	10,84	7650,75	7026,46
Unidade 3	17,17	17,78	14001,35	14478,65
Total	41,56^{NS}	42,59^{NS}	30767,27^{NS}	29214,30^{NS}

NS = Não Significativo pelo Teste de Mann-Whitney a 5% de significância. Fonte: Dados da pesquisa (2024).

358
 359
 360
 361
 362
 363
 364
 365
 366
 367
 368
 369
 370

Após a análise estatística dos dados, observou-se que não houve diferença entre os valores observados e estimados de volume e biomassa florestal, sendo o valor de p igual a 0,3892 e 0,636, respectivamente. A Unidade 3 apresentou os maiores valores de volume (17,78 m³) e biomassa florestal (14478,65 kg), e a Unidade 2, os menores valores (10,84 m³ e 7026,46 kg, respectivamente). Na Figura 7, observa-se a distribuição espacializada do volume e da biomassa florestal nas unidades avaliadas.



371 *Figura 7 – Distribuição espacializada pelo RF a partir do ExR (volume) (A) e o NDRE (Biomassa Florestal) (B)*
 372 *nas unidades avaliadas para as 48 parcelas durante o período seco via imagem de satélite. Fonte: Dados da*
 373 *pesquisa (2024).*
 374

375 Na Figura 7, é possível observar a distribuição espacial detalhada do volume e da biomassa florestal para as
 376 unidades avaliadas.
 377

378 3.2 Período chuvoso (imagem de satélite)

379 Os resultados do RF, segundo a Tabela 4, tanto para estimativa de volume como para a biomassa florestal,
 380 foram superiores aos demais modelos de regressão utilizados. Para o volume, 88% da sua variação nas parcelas
 381 foram explicados pelo RF, ao passo que para a biomassa florestal o valor foi de 89%. Estes resultados são
 382 satisfatórios, principalmente quando se referem a dados espaciais com distribuição de probabilidade diferente.
 383

Tabela 4 – Resultados dos modelos testados, no período chuvoso, para estimativa de volume e biomassa florestal a partir dos Índices Espectrais para as 48 parcelas. Em que: RMSE = Raiz Quadrada do Erro Médio; R2 = Coeficiente de Determinação; Bias = Viés/erro sistemático.

Modelo	Volume			Biomassa Florestal		
	RMSE	R2	Bias	RMSE	R2	Bias
GLM	0,49	0,53	0,00	415,43	0,43	-1,65E-01
GAM	0,34	0,78	0,00	248,34	0,80	7,98E-03
RF	0,30	0,88	577,90	234,91	0,89	8,90E+05

384 *Fonte: Dados da pesquisa (2024).*

385
 386 Na Figura 8, é possível observar a análise de regressão pelo RF para todos os IE (A e C); e aqueles IE que mais
 387 contribuíram para a estimativa de volume e biomassa florestal (B). O NIRG, GNDVI e CHI foram os mais
 388 significativos de acordo com o RF.
 389
 390
 391
 392
 393
 394
 395
 396
 397
 398
 399
 400
 401
 402
 403
 404

405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435

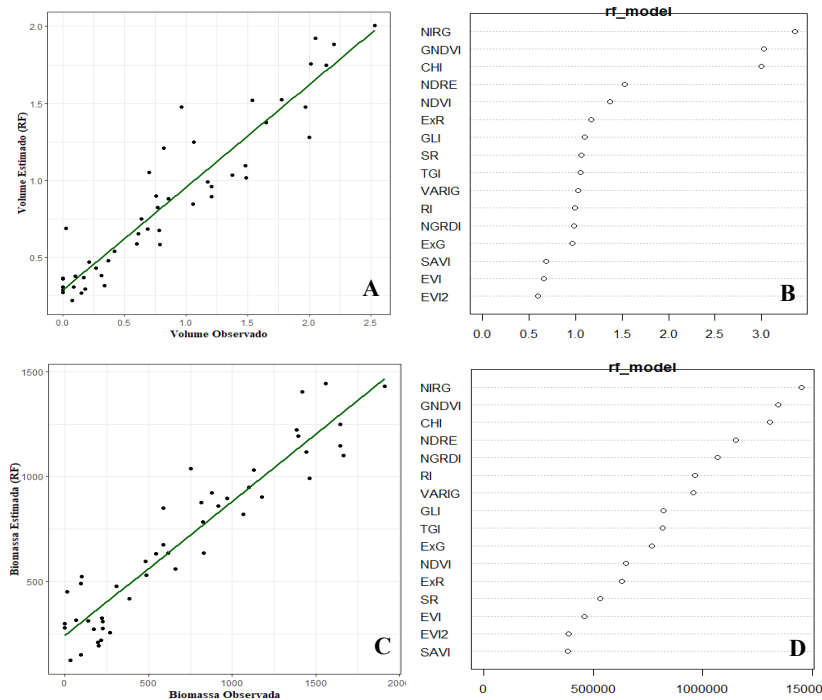


Figura 8 – Análise de regressão pelo RF para todos os IE (A e C); IE que mais contribuíram para a estimativa do volume e da biomassa florestal (B e D) durante o período chuvoso via imagem de satélite.
Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Os índices NIRG, GNDVI e CHI foram os mais importantes tanto para a estimativa de volume como para a biomassa florestal durante o período chuvoso a partir da imagem de satélite pelo RF, visto que, quanto mais à direita estiver o círculo referente ao IE, maior é sua contribuição. Posteriormente, foi realizada a espacialização das unidades a partir desses índices espectrais. Na Tabela 5, apresentam-se os valores observados e estimados pelo NIRG, GNDVI e CHI.

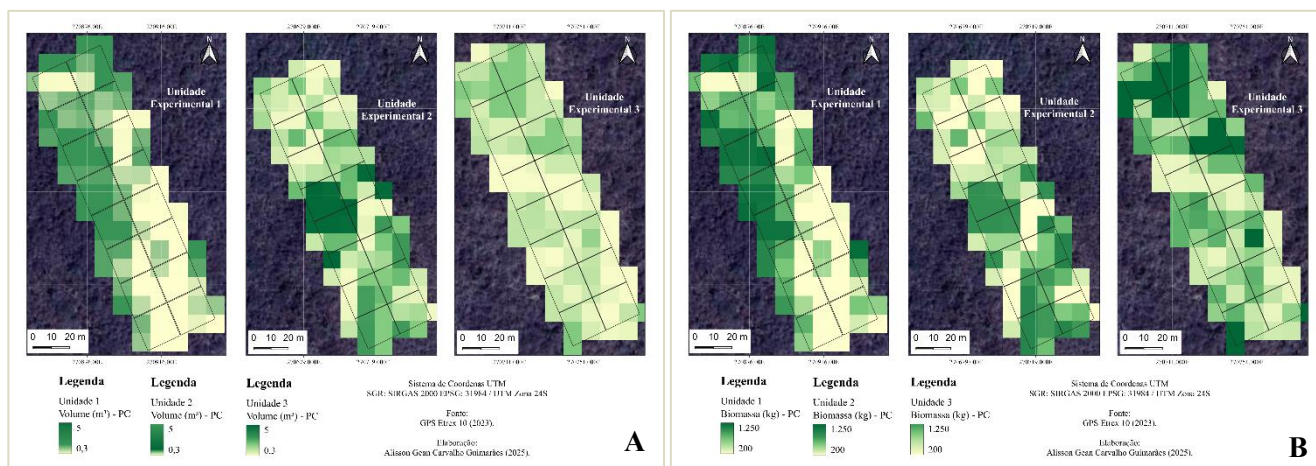
Tabela 5 – Resultados da espacialização pelo RF utilizando o NIRG, GNDVI e CHI para estimativa de Volume e Biomassa Florestal nas unidades avaliadas para as 48 parcelas durante o período chuvoso via imagem de satélite.

Unidades	Volume Observado (m ³)	Volume Estimado (m ³)	Biomassa Observada (kg)	Biomassa Estimada (kg)
Unidade 1	13,96	15,13	9115,17	9910,98
Unidade 2	10,43	10,95	7650,75	8335,78
Unidade 3	17,17	17,44	14001,35	14224,96
Total	41,56^{NS}	43,52^{NS}	30767,27^{NS}	32471,72^{NS}

NS = Não Significativo pelo Teste de Mann-Whitney a 5% de significância. Fonte: Dados da pesquisa (2024).

436
437
438
439
440
441
442
443

Após a análise estatística dos dados, verificou-se que não houve diferença na estimativa de volume e biomassa florestal entre os valores observados e estimados, sendo o valor de p igual a 0,406 e 0,299, respectivamente. A Unidade 3 apresentou os maiores valores de volume (17,44 m³) e biomassa florestal (14224,96 kg), e a Unidade 2, os menores valores (10,95 m³ e 8335,78 kg, respectivamente). Na Figura 9, segue a distribuição espacializada do volume e da biomassa florestal nas unidades avaliadas.



445
 446 *Figura 9 – Distribuição espacializada pelo RF a partir do NIRG, GNDVI e CHI para estimativa de Volume (A) e*
 447 *Biomassa Florestal (B) nas unidades avaliadas para as 48 parcelas durante o período chuvoso via imagem de*
 448 *satélite. Fonte: Dados da pesquisa (2024).*
 449

450 Conforme a Figura 9, é possível observar a distribuição espacial detalhada do volume e da biomassa florestal
 451 para as unidades avaliadas.

452 **3.3 Período seco (imagem de drone)**
 453

454 Na Tabela 6, pode-se observar que o RF, tanto para estimativa de volume como para a biomassa florestal,
 455 apresentou resultados superiores aos demais modelos de regressão. Para o volume, 83% da sua variação nas
 456 parcelas foram explicados pelo RF, ao passo que para a biomassa florestal o valor foi de 89%.
 457

Tabela 6 – Resultados dos modelos testados, no período seco, para estimativa de volume e biomassa florestal a partir dos Índices Espectrais utilizando a imagem de drone para as 48 parcelas. Em que: RMSE = Raiz Quadrada do Erro Médio; R2 = Coeficiente de Determinação; Bias = Viés/erro sistemático.

Modelo	Volume			Biomassa Florestal		
	RMSE	R2	Bias	RMSE	R2	Bias
GLM	0,64	0,21	-9,61E-09	497,95	0,18	-8,32E-06
GAM	0,55	0,41	1,21E-04	418,15	0,42	-8,05E-02
RF	0,37	0,87	6,46E+03	283,64	0,87	1,25E+05

458 *Fonte: Dados da pesquisa (2024).*

459
 460 Na Figura 10, visualiza-se a análise de regressão pelo RF para todos os IE (A e C); e aqueles IE que mais
 461 contribuíram para a estimativa de volume e biomassa florestal (B). TGI e ExR foram os mais significativos para
 462 estimativa do volume e da biomassa florestal.
 463

464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496

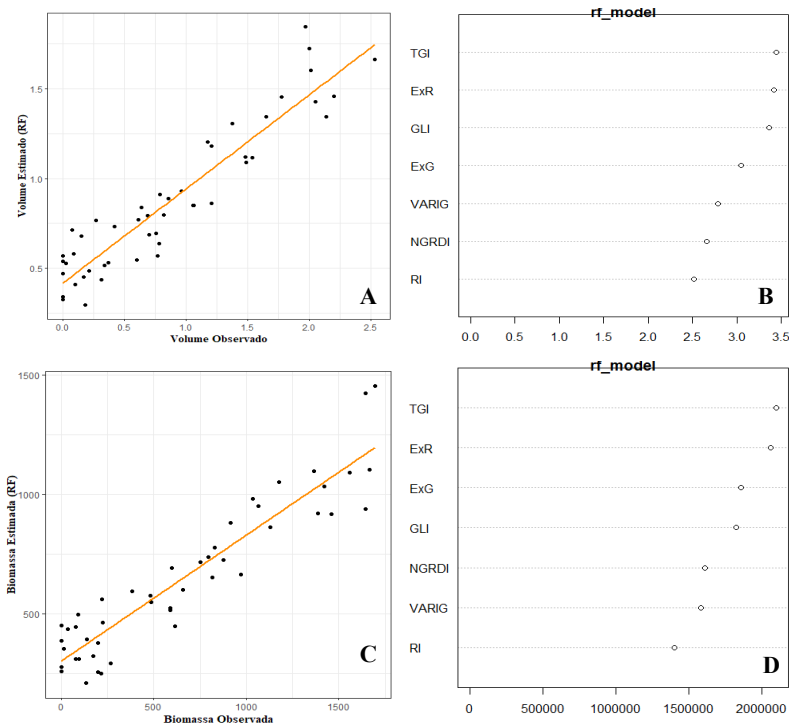


Figura 10 – Análise de regressão pelo RF para todos os IE (A e C); IE que mais contribuíram para a estimativa do volume e da biomassa florestal (B e D) durante o período seco via imagem de drone. Fonte: Dados da pesquisa (2024).

O índice TGI foi superior aos demais para estimativa do volume, e o TGI e o ExR se destacaram na estimativa de biomassa florestal durante o período seco a partir da imagem de drone pelo RF. Desse modo, esses IE foram considerados para realizar a espacialização das unidades. Na Tabela 7 encontram-se os valores observados e estimados pelos índices citados.

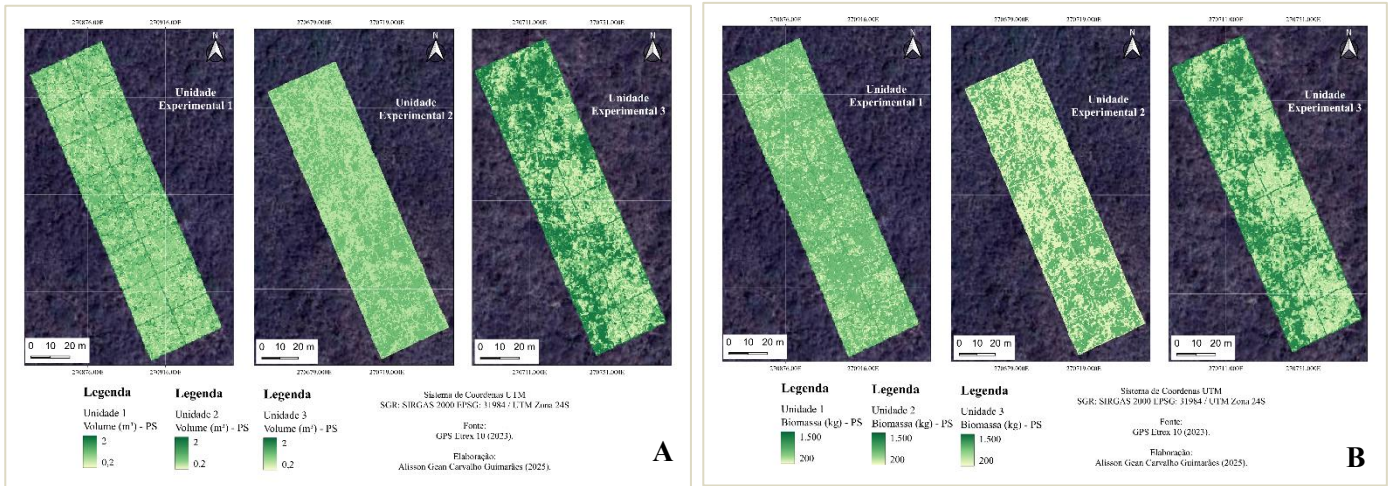
Tabela 7 – Resultados da espacialização pelo RF utilizando TGI para estimativa de volume e TGI e ExR para estimativa de biomassa florestal nas unidades avaliadas para as 48 parcelas durante o período seco via imagem de drone.

Unidades	Volume Observado (m³)	Volume Estimado (m³)	Biomassa Observada (kg)	Biomassa Estimada (kg)
Unidade 1	13,96	15,09	9115,17	10152,14
Unidade 2	10,43	11,32	7650,75	9200,39
Unidade 3	17,17	19,00	14001,35	14207,68
Total	41,56^{NS}	45,41^{NS}	30767,27^{NS}	33560,22^{NS}

NS = Não Significativo pelo Teste de Mann-Whitney a 5% de significância. Fonte: Dados da pesquisa (2024).

497
498
499
500
501
502
503
504
505

Após a análise dos dados, verificou-se que não houve diferença na estimativa de volume e biomassa florestal entre os valores observados e estimados, sendo o valor de p igual a 0,123 e 0,156, respectivamente. A Unidade 3 apresentou os maiores valores de volume (19,00 m³) e biomassa florestal (14207,68 kg), e a Unidade 2, os menores valores (11,32 m³ e 9200,39 kg, respectivamente). Na Figura 11, observa-se a distribuição espacializada do volume e da biomassa florestal nas unidades avaliadas.



506 *Figura 11 – Distribuição espacializada pelo RF a partir do TGI e ExR para estimativa de Volume (A) e da*
 507 *Biomassa Florestal (B) nas unidades avaliadas para as 48 parcelas durante o período seco via imagem de*
 508 *drone. Fonte: Dados da pesquisa (2024).*
 509

510 A partir da imagem de drone, observa-se uma discriminação de forma mais detalhada da distribuição espacial
 511 do volume e da biomassa florestal para as unidades avaliadas, em relação à imagem de satélite, o que se deve
 512 sobretudo à maior resolução espacial da imagem de drone.

514 3.4 Período chuvoso (imagem de drone)

515 Os resultados do RF, conforme a Tabela 8, tanto para estimativa de volume como para a biomassa florestal,
 516 foram superiores aos demais modelos de regressão. Para o volume, 87% da sua variação nas parcelas foram
 517 explicados pelo RF, de modo que para a biomassa florestal o valor foi de 84%.
 518
 519

Tabela 8 – Resultados dos modelos testados, no período chuvoso, para estimativa de volume e biomassa florestal a partir dos Índices Espectrais utilizando a imagem de drone para as 48 parcelas. Em que: RMSE = Raiz Quadrada do Erro Médio; R2 = Coeficiente de Determinação; Bias = Viés/erro sistemático.

Modelo	Volume			Biomassa Florestal		
	RMSE	R2	Bias	RMSE	R2	Bias
GLM	0,53	0,45	-8,69E-08	405,86	0,46	-6,34E-05
GAM	0,53	0,45	2,00E-04	405,75	0,46	-6,78E-02
RF	0,38	0,87	8,19E+03	304,32	0,84	1,31E+07

520 *Fonte: Dados da pesquisa (2024).*

521 Na Figura 12, visualiza-se a análise de regressão pelo RF para todos os IE (A e C); e aqueles IE que mais
 522 contribuíram para a estimativa de volume e biomassa florestal (B). ExG e GLI foram os mais significativos para
 523 estimativa de volume, de modo que VARIG e ExR foram os mais representativos para a biomassa florestal.
 524

525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560

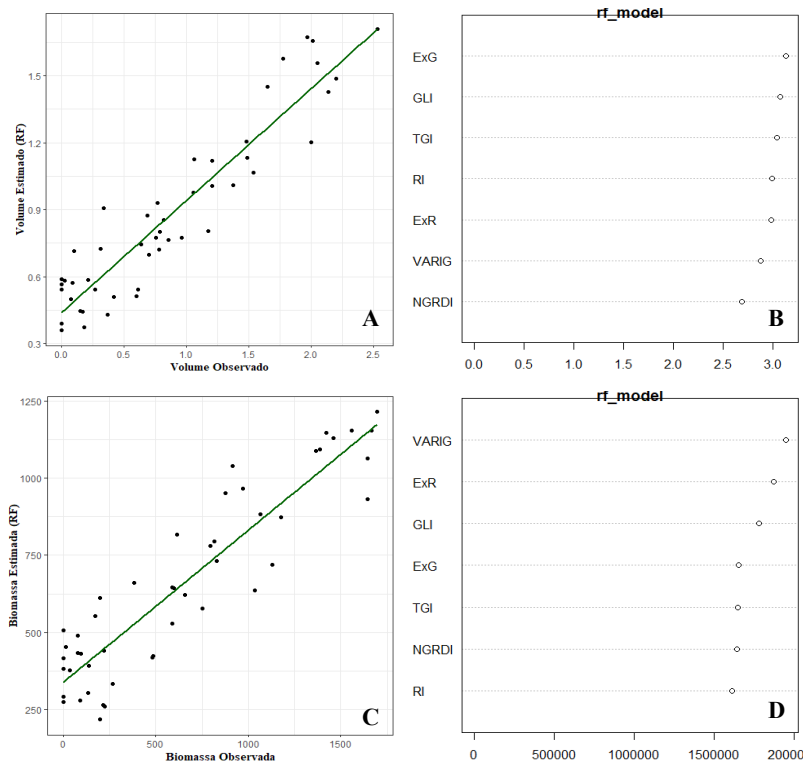


Figura 12 – Análise de regressão pelo RF para todos os IE (A e C); IE que mais contribuíram para a estimativa do volume e da biomassa florestal (B e D) durante o período chuvoso via imagem de drone. Fonte: Dados da pesquisa (2024).

Os índices ExG e GLI se sobressaíram na estimativa de volume, ao passo que VARIG e ExR foram superiores para estimativa de biomassa florestal durante o período chuvoso a partir da imagem de drone pelo RF. Dessa forma, esses IE foram considerados para realizar a espacialização das unidades. Na Tabela 9, encontram-se os valores observados e estimados pelos índices citados.

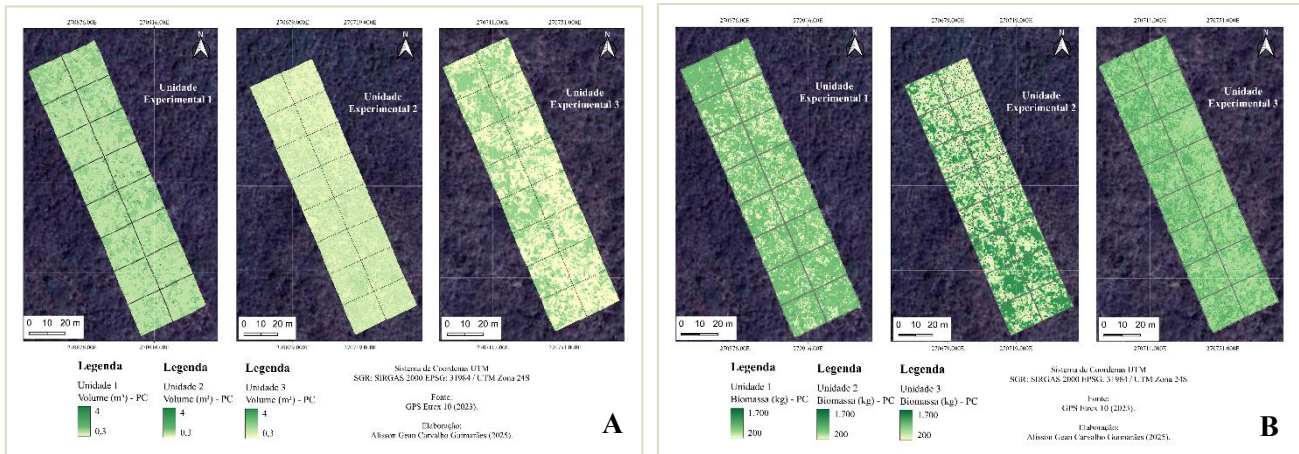
Tabela 9 – Resultados da espacialização pelo RF utilizando ExG e GLI (volume) e VARIG e ExR (biomassa florestal) nas unidades avaliadas para as 48 parcelas durante o período chuvoso via imagem de drone.

Unidades	Volume Observado (m³)	Volume Estimado (m³)	Biomassa Observada (kg)	Biomassa Estimada (kg)
Unidade 1	13,96	16,56	9115,17	9938,05
Unidade 2	10,43	10,00	7650,75	10476,92
Unidade 3	17,17	17,12	14001,35	13775,06
Total	41,56^{NS}	43,68^{NS}	30767,27^{NS}	34190,03^{NS}

NS = Não Significativo pelo Teste de Mann-Whitney a 5% de significância. Fonte: Dados da pesquisa (2024).

561
562
563
564
565
566
567
568

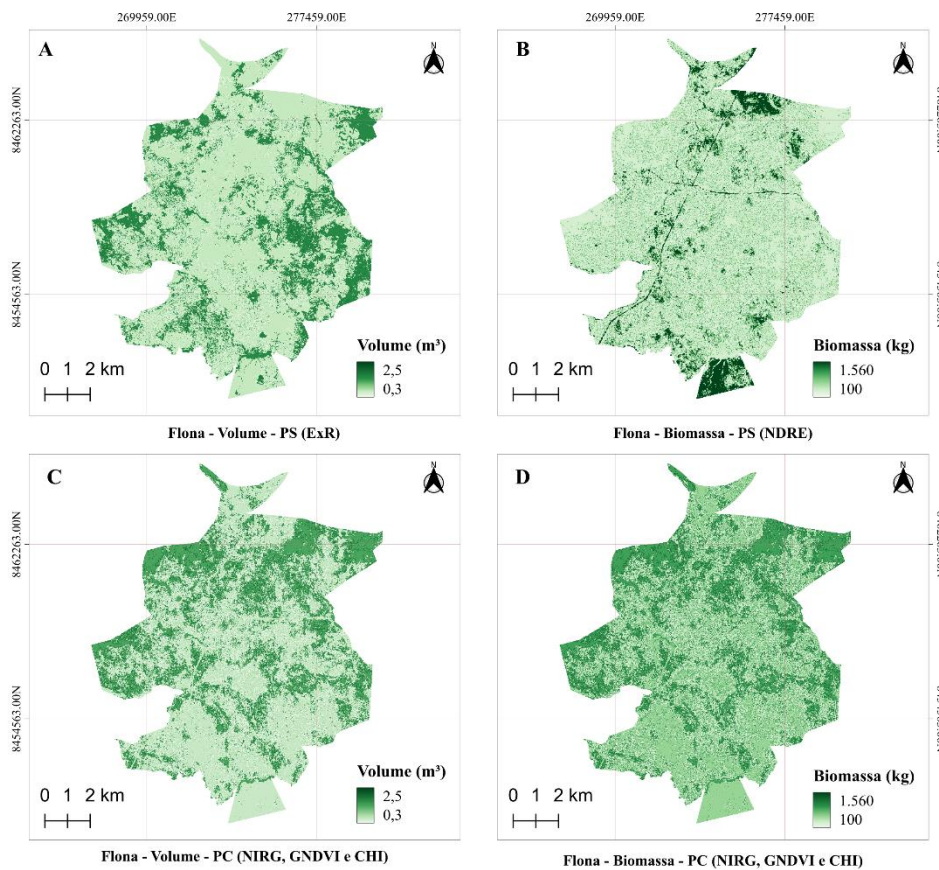
Após a análise dos dados, verificou-se que não houve diferença na estimativa de volume e biomassa florestal entre os valores observados e estimados, sendo o valor de p igual a 0,270 e 0,144, respectivamente. A Unidade 3 apresentou os maiores valores de volume (17,12 m³) e biomassa florestal (13775,06 kg), a Unidade 2, o menor valor de volume (10,00 m³), e a Unidade 1, o menor valor para a biomassa florestal (9938,05 kg). Na Figura 13, é possível observar a distribuição espacializada do volume e da biomassa florestal nas unidades avaliadas.



569 *Figura 13 – Distribuição espacializada pelo RF a partir do GLI e ExG para estimativa de volume (A) e VARIG e*
 570 *ExR para a biomassa florestal (B) nas unidades para as 48 parcelas avaliadas durante o período chuvoso via*
 571 *imagem de drone. Fonte: Dados da pesquisa (2024).*

573 3.5 Espacialização para a FLONA (período seco e chuvoso)

574
 575 A espacialização do volume e da biomassa florestal para a área da Flona foi realizada via imagem de satélite
 576 para ambos os períodos (seco e chuvoso). Para tanto, como ExR e NDRE se destacaram na estimativa dos
 577 parâmetros durante o período seco, ambos foram utilizados para obtenção dos resultados. Para o período chuvoso
 578 aplicaram-se os índices NIRG, GNDVI e CHI em virtude de sua superioridade (Figura 14).
 579



610 *Figura 14 – Distribuição espacializada pelo RF a partir do ExR (volume) e do NDRE (biomassa florestal) via*
 611 *imagem de satélite no período seco (A e B); e de NIRG, GNDVI e CHI (volume e biomassa florestal) via imagem*
 612 *de satélite no período chuvoso (C e D). Fonte: Dados da pesquisa (2024).*
 613

614 A distribuição espacializada dos Índices Espectrais para a área da FLONA permite observar possíveis locais de
615 maior presença e/ou ausência de volume e biomassa florestal, reforçando a importância da utilização do
616 sensoriamento remoto e suas diferentes técnicas de processamento no monitoramento, na quantificação e no
617 entendimento dos recursos florestais, principalmente em unidades de conservação.

618 619 **4. Discussão**

620 621 **4.1. Período seco e chuvoso (imagem de satélite)**

622 O RF apresentou resultados superiores em relação aos demais modelos de regressão em ambos os períodos
623 (seco e chuvoso). O R² foi superior a 91% para o volume e maior que 89% para a biomassa florestal, ou seja, o
624 modelo captou grande parte da variação desses parâmetros para as 48 parcelas em função dos Índices Espectrais
625 (IE). Estes resultados são satisfatórios, ainda mais quando se referem a dados espaciais com distribuição de
626 probabilidade diferente. Em suma, as técnicas de sensoriamento remoto aplicadas foram eficientes, não
627 apresentando diferença entre métodos de predição direta. Em trabalho realizado por Teixeira *et al.* (2024) foi
628 analisada a relação temporal de Índices Espectrais como subsídio à estimativa de biomassa acima do solo em
629 sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) por meio de regressão linear múltipla, de modo que os
630 autores concluíram que os valores do nível de pixel demonstraram relações nulas a fracas. Isso denota que as
631 técnicas de regressão clássica não são suficientes para explicar o comportamento de dados espacializados.

632 Apesar de não haver diferenças entre os valores observados e estimados de volume e biomassa florestal, os
633 Índices Espectrais que se destacaram no período seco diferem dos que foram significativos no período chuvoso.
634 Isso se deve sobretudo às características da vegetação de Caatinga (floresta seca), que apresenta comportamento
635 distinto durante o ano. No período de maior restrição hídrica (até nove meses, dependendo da localidade), muitas
636 espécies nativas perdem suas folhas como forma de evitar a perda de água por evapotranspiração, restringindo seu
637 crescimento. No período chuvoso, as espécies produzem muitas folhas e crescem com mais facilidade. Essa
638 particularidade da vegetação influencia sua assinatura espectral. Esse comportamento também foi observado no
639 trabalho de Caetano *et al.* (2022), que investigaram a interferência de Índices Espectrais na caracterização da
640 cobertura vegetal em região de Caatinga do Semiárido Baiano e concluíram que a área urbana foi bem discriminada
641 nas imagens do período chuvoso e as zonas de menor altitude apresentaram maiores valores para os índices e as
642 de maior altitude, menores valores.

643 Fernandes e Queiroz (2018) ressaltaram que a caducifólia em florestas secas é uma característica marcante da
644 maior parte das árvores e arbustos, influenciada pela disponibilidade hídrica, afetando diretamente o
645 desenvolvimento das espécies vegetais. Assim, com o início das precipitações, mesmo que mínimas, as folhas
646 surgem rapidamente e as espécies reproduzem-se em um curto espaço de tempo.

647 Outro fator que interfere nos Índices Espectrais são características intrínsecas de cada um, ou seja, os índices
648 possuem propriedades, comprimentos das suas bandas espectrais diferentes, finalidades distintas, sofrem
649 influência atmosférica, bem como dos próprios sensores, permitindo que cada índice explore detalhes variados da
650 floresta. Segundo Dai *et al.* (2021), fatores como espaçamento entre árvores, idades distintas, estrutura da copa,
651 espalhamento, abertura/fechamento do dossel e o tipo de floresta (nativa ou plantada) podem interferir na captura
652 pelos sensores e conferir diferentes respostas espectrais.

653 Para estimativa de volume e biomassa florestal durante o período seco, o NDRE foi o mais importante. Este é
654 um índice espectral que utiliza a diferença normalizada na transição do vermelho, combinando as bandas espectrais
655 do infravermelho próximo e a banda que se encontra entre o vermelho visível e a zona de transição vermelho,
656 sendo muito sensível a mudanças nas propriedades da vegetação, o que pode ser facilmente explorado por
657 pesquisadores. Além disso, o NDRE propicia uma análise mais precisa da transição entre as plantas mais saudáveis
658 para as menos saudáveis, não saturando facilmente como o NDVI (Jorge; Vallbé; Soler, 2019).

659 Com relação à estimativa de volume e biomassa florestal durante o período chuvoso, também não houve
660 diferença entre os valores observados e estimados. Os índices GNDVI, NIRG e CHI se destacaram. São IE que
661 utilizam comprimentos de onda do infravermelho próximo e da região do verde. Com o aumento da precipitação
662 pluviométrica, a floresta retoma seu crescimento aumentando a produção foliar e, conseqüentemente, a atividade
663 fotossintética. Dessa forma, esses índices captam a variação dos teores de clorofila na floresta.

664 O índice espectral de diferença normalizada verde (GNDVI) tem a mesma forma que o NDVI, onde a banda
665 vermelha é substituída pela banda verde. Segundo Hunt *et al.* (2008), o GNDVI rastreia a proporção de radiação
666 absorvida fotossinteticamente e está correlacionado com a biomassa, tornando-o mais sensível ao conteúdo de
667 clorofila comparado ao NDVI (Candiago *et al.*, 2015). Estudo realizado por Carvalho e Nero (2024) na avaliação
668 de Índices Espectrais na estimativa de volume em florestas decíduais encontrou uma forte correlação entre os
669 Índices Espectrais, em especial o GNDVI (0,82), e os volumes de madeira das amostras coletadas em campo.

670 Freire-Silva *et al.* (2019) destacaram que os Índices Espectrais melhoraram as análises do SR, resultando em
671 novos conhecimentos que contribuíram diretamente para o entendimento dos ecossistemas, especialmente os
672 ambientes vegetacionais.

674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731

4.2. Período seco e chuvoso (imagem de drone)

Para a imagem de drone também não houve diferença entre o observado em campo do valor estimado pelo modelo RF, considerando ambos os períodos (seco e chuvoso), exceto a estimativa de volume no período chuvoso. O R2 foi superior a 87% para o volume e para a biomassa florestal, ou seja, o modelo captou grande parte da variação desses parâmetros.

A espacialização realizada pela imagem de drone apresentou maior detalhamento da distribuição do volume e da biomassa florestal, o que se deve à menor altura de voo pelo drone e à maior resolução espacial, em comparação com a imagem de satélite.

Dentre os sete Índices Espectrais aplicados nos diferentes períodos (seco e chuvoso) para a imagem de drone, TGI e ExR se destacaram na estimativa de volume e da biomassa florestal. O TGI foi idealizado no intuito de estimar os níveis de clorofila principalmente em culturas agrícolas, todavia considerou-se utilizá-lo em áreas florestais cujo resultado foi promissor. Pesquisa realizada por Silva, Elias e Rosário (2022) na análise da cultura da soja a partir de Índices Espectrais (ExG – GLI – TGI – VEG) advindos de imagens RGB obtidas com Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) concluiu que o TGI se mostrou mais suscetível às alterações na coloração das plantas.

O ExR, por sua vez, é um índice espectral utilizado para avaliar a presença e a saúde da vegetação. Faz parte dos “Excess”, que combinam bandas espectrais diferentes para realçar características das plantas, sendo sensível aos níveis de clorofila. Quando a resposta na banda vermelha é evidente, o mesmo tende a destacar-se (Das *et al.*, 2016).

Com relação ao período chuvoso via imagem de drone, os Índices Espectrais ExG e GLI foram superiores aos demais, estando associados possivelmente à retomada de crescimento com o aumento da precipitação. O GLI é um índice de clorofila e representa a mudança da vegetação, indicando plantas vivas, mortas e o solo exposto (Arejano *et al.*, 2023). Conforme estudo realizado pelos autores supracitados, na avaliação de resoluções espacial e temporal a partir do GLI com a utilização de drone e imagem de satélite na cultura do trigo na cidade de Catanduvas-PR, os resultados do GLI com uso do drone foram mais eficientes, demonstrando maior sensibilidade aos problemas presentes na área de plantio.

O ExG foi criado por Woebbecke *et al.* (1995) para a diferenciação da área vegetativa do solo e fragmentos da vegetação. Silva, Elias e Rosário (2022), na análise da cultura da soja a partir de Índices Espectrais provenientes de imagens RGB obtidas com ARP, concluíram que o ExG discriminou bem a cobertura vegetal sadia e caracterizou com precisão locais onde havia solo exposto.

O VARIG foi concebido para enfatizar a vegetação na região visível do espectro, no intuito de minimizar as diferenças de iluminação e a influência atmosférica (Gitelson *et al.* 2002).

5. Considerações finais

As técnicas de processamento digital de imagens combinadas com o Modelo Random Forest (RF) apresentaram resultados significativos quando correlacionadas à estimativa de volume e biomassa florestal. Assim, considerando a lacuna de estudos científicos que correlacionam Índices Espectrais a partir de imagens de satélites ou drones com espécies arbustivo-arbóreas na estimativa de parâmetros florestais, recomenda-se a realização de outras pesquisas em ambientes de florestas secas, de modo específico em área de Caatinga, cujo comportamento da vegetação difere em decorrência das alterações climáticas.

Os índices espectrais ExR, NDRE, NIRG, GNDVI e CHI se sobressaíram via imagem de satélite, ao passo que os índices ExR, TGI, ExG, GLI e VARIG se destacaram para a imagem de drone na estimativa de volume e biomassa florestal.

A espacialização para a FLONA permitiu observar a distribuição de volume e da biomassa florestal em toda sua extensão, ou seja, o Modelo Random Forest identificou áreas com maior potencial de estocagem desses recursos. Tal feito pode auxiliar a criação de políticas públicas de conservação e na definição de zonas prioritárias dentro da unidade, facilitando processos de tomada de decisão sobretudo pelo órgão gestor (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio).

Vale ressaltar que os IE disponíveis na literatura não foram idealizados com especificidade para área de Caatinga, representando um grande desafio para realização de futuros trabalhos, tendo em vista que este bioma apresenta características peculiares, como o processo de caducifolia de muitas espécies nativas durante o período de maior restrição hídrica. Esta particularidade influi diretamente na captura pelos sensores, sejam satélites ou drones, pois na ausência de folhas a resposta espectral da vegetação se assemelha a outros alvos como o solo.

732 **Agradecimentos**

733 Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela
734 concessão da bolsa, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio
735 financeiro ao projeto (processo nº 88887.824010/2023-00). Ao ICMBio do estado da Bahia pela permissão para
736 desenvolver esta pesquisa na Floresta Nacional Contendas do Sincorá (FLONA) e ao Laboratório de Ecologia e
737 Proteção Florestal (LEPFlor) da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, *campus* de Vitória da
738 Conquista.

739 **Referências**

- 740 Arejano, L. M.; Ruppenthal, J. G.; Nobre, F. L.; Pazuch, F. A.; Santos, R. F.; Pereira, I. R.; Quadro, M. S. (2023).
741 Avaliação das resoluções espacial e temporal do índice vegetativo GLI através de imagens de drone e satélite
742 na cidade de Catanduvas-PR. **International Journal of Environmental Resilience Research and Science**,
743 v. 5, n. 1, p. 1-12, 2023.
- 744 Azevedo, L. S.; Barbosa, L. C. Estudo do índice de vegetação e temperatura da superfície terrestre na área de
745 proteção ambiental Triunfo do Xingu (PA) utilizando o Google Earth Engine. **Rev. Geociênc. Nordeste**, v.6,
746 n.2, p.244-256, 2020.
- 747 Barbosa, H. A.; Flash Drought and Its Characteristics in Northeastern South America during 2004–2022 Using
748 Satellite-Based Products. **Atmosphere**, v. 14, n. 1629. 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14111629>
- 749 Caetano, R.; Silva, T. B.; Benfica, N. S.; Castro, D. R. Uso de índices espectrais na caracterização da cobertura
750 vegetal em região de Caatinga do Semiárido Baiano. **Rev. Geociênc. Nordeste**, v.8, n.2, p.28-43, 2022.
- 751 Candiago, S.; Remondino, F.; Giglio, M.; Dubbini, M.; Gatelli, M. Evaluating multispectral images and vegetation
752 índices for precisión farming applications from UAV images. **Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 4026-4047. 2015.
753 doi:10.3390/rs70404026
- 754 Carvalho, L. F.; Nero, M. A. Avaliação de índices de vegetação na estimativa de volume em florestas decíduais:
755 um modelo preditivo. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 18, n. 2, p. 60-75, 2024.
- 756 Carvalho, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) -
757 Brasília, v. 3. 2008.
- 758 Cardoso, P. V.; Seabra, V. S.; Xavier, R. A.; Rodrigues, E. M.; Gomes, A. S. Mapeamento de Áreas de Caatinga
759 Através do Random Forrest: Estudo de caso na Bacia do Rio Taperoá. **Revista Geoaraguaia**, v.11, n. esp, p.
760 55-68, 2021.
- 761 Carvalho, H. F. S.; Moura, M. S. B.; Silva, T. G. F.; Galvêncio, J. D.; Antonino, A. C. D.; Menezes, R. S. C., ...
762 Nóbrega, R. L. B. Uso de Laser Scanner Terrestre para Estimativa de Biomassa Acima do Solo em Floresta
763 Tropical Sazonalmente Seca. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 6, n. 5, p. 2741–2657. 2023.
764 <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.5.p2741-2657>
- 765 Dai, P. V. S.; Baio, F. H. R.; Azevedo, G. B.; Fagundes, L. A.; Trento, A. C. S. Estimativa de volume de madeira
766 baseada em índices de vegetação. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, p. e3301, 2021.
767 <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.06>
- 768 Das, B.; Sahoo, R. N.; Pargal, S.; Krishna, G.; Gupta, V. K.; Verma, R. & Viswanathan, C. Measuring leaf area
769 index from colour digital image of wheat crop. **Journal of Agrometeorology**, v. 18, n.1, p. 22-28, 2016.
- 770 Dunn, O. J. Multiple comparisons using rank sums. **Technometrics**, v.6, n.3, p.241-252, 1964.
- 771 European Space Agency. ESA. **Harmonized Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A**. Copernicus
772 Open Access Hub. Disponível em: [https://developers.google.com/earth-](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED)
773 [engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED). Acesso em: 14 jan. 2025.
- 774 El Kenawy, A. M.; Hereher, M. E.; Robaa, S. M. An Assessment of the Accuracy of MODIS Land Surface
775 Temperature over Egypt Using GroundBased Measurements. **Remote Sensing**, v. 11, p. 1-29. 2019.
- 776 Escadafal, R.; Huete, A. Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de
777 végétation obtenus par télédétection. **Comptes Rendus de l'Académie des Sciences**, v. 312, 1385-1391,
778 1991.
- 779 Fernandes, M. F.; Queiroz, L. P. Vegetação e flora da caatinga. **Ciência e cultura**, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018.

- 780 Freire-Silva, J.; Paz, Y. M.; Lima-Silva, P. P.; Pereira, J. A.; Candeias, A. L. B. Remote Sensing vegetation index
781 for processing images in the visible band (RGB). **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, p. 228-
782 239, 2019.
- 783 Funk, C.; Peterson, P.; Landsfeld, M.; Pedreros, D.; Verdin, J.; Shukla, S.; Husak, G.; Rowland, J.; Harrison, L.;
784 Hoell, A.; Michaelsen, J. The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record
785 for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015.
- 786 Galvencio, J. D.; Miranda, R. Q.; Moura, M. S. B.; Montenegro, S. M. G. Adiva-Análise de índice de vegetação e
787 água nota científica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15 n. 03, p. 1654-1659, 2022.
- 788 Ganem, K. A.; Dutra, A. C.; de Oliveira, M. T.; de Freitas, R. M.; Cristina, R. Mapeamento da Vegetação da
789 Caatinga a partir de Dados Ópticos de Observação da Terra-Oportunidades e Desafios. **Revista Brasileira de**
790 **Cartografia**, v. 72, p. 829-854, 2020.
- 791 Gitelson, A. A.; A. Vina, V.; Ciganda, D. C.; Rundquist, T. J. A. Remote estimation of canopy chlorophyll content
792 in crops, **Geophys. Res. Lett.**, 32, L08403, 2005. doi:10.1029/2005GL022688.
- 793 Gitelson, A. A.; Kaufman, Y. J.; Merzlyak, M. N. Use of a green channel in remote sensing of global vegetation
794 from EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, n. 3, p. 289-298. 1996.
- 795 Gitelson, A. A.; Kaufman, Y. J.; Stark, R.; Rundquist, D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation
796 fraction. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, p. 76-87, 2002.
- 797 Gitelson, A. A.; Merzlyak, M. N. Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: experiments
798 with autumn chestnut and maple leaves. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**.
799 Netherlands, v. 22, n. 3, p. 247-252, 1994. [http://dx.doi.org/10.1016/1011-1344\(93\)06963-4](http://dx.doi.org/10.1016/1011-1344(93)06963-4).
- 800 Gitelson, A. A.; Merzlyak, M. N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. **International**
801 **Journal of Remote Sensing**, v. 18, n. 12, p. 2691-2697. 1997. <http://dx.doi.org/10.1080/014311697217558>.
- 802 Gorelick, N.; Hancher, M.; Dixon, M.; Ilyushchenko, S.; Thau, D.; Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-
803 scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017. Disponível
804 em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900>. Acesso em: 11 jan. 2025.
- 805 Hammer, Ø.; Harper, D. A. T.; Ryan, P. D. **PAST**: Paleontological Statistics software package for education and
806 data analysis. *Paleontologia Electronica*, 4:9. 2001.
- 807 Huete, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 25, n.3, p. 295-309,
808 1998.
- 809 Hunt, E. R.; Daughtry, C. S. T.; Eitel, J. U. H.; Long, D. S. Remote sensing leaf chlorophyll content using a visible
810 band index. **Agronomy Journal**, v. 103, p. 1090-1099, 2011.
- 811 Hunt, J.; Hively, W. D.; Daughtry, C. S. T.; McCarty, G. W. Remote sensing of crop leaf area index using unmanned
812 airborne vehicles. In Proceedings of the Pecora 17 Conference, **American Society for Photogrammetry and**
813 **Remote Sensing**, Denver, Colorado. 2008.
- 814 IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico da Vegetação Brasileira**. Rio de Janeiro,
815 p. 271, 2012.
- 816 Jiang, Z.; Huete, A. R.; Didan, K.; Miura, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue
817 band, **Remote Sensing of Environment**, v. 112, p. 3833-3845, 2008.
- 818 Jordan, C. F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Jordan Source: Ecology**, v.
819 50, p. 663-666, 1969.
- 820 Jorge, J.; Vallbé, M.; Soler, J, A. Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE
821 vegetation index obtained from UAV images. **European Journal of Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 169-177.
822 2019. <https://doi.org/10.1080/22797254.2019.1572459>
- 823 Justice, C. O. *et al.* The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for
824 global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228-1249.
825 1998. <http://dx.doi.org/10.1109/36.701075>.
- 826 Kruskal, W. H., Wallis, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Am. Stat. Assoc.**, v. 47, n. 260, p.

- 827 583-621, 1952.
- 828 Lorenzi, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova
829 Odessa: Plantarum, v. 2. 1998.
- 830 Louhaichi, M.; Borman, M. M.; Johnson, D. E. Spatially located platform and aerial photography for
831 documentation of grazing impacts on wheat. **Geocarto International**, v. 16, p. 65-70, 2001.
- 832 Marinho, L. C.; Costa, G. M.; Corrêa, M. M.; Freire, A. C.; Martins, F. R. S.; Peixoto, M. R.; Silva, S. R.; Soares
833 Filho, A. O.; Vítório, C.; Zappi, D. C.; Aona, L. Y. S. 2020. Lista de espécies de plantas vasculares da Floresta
834 Nacional Contendas do Sincorá. In: **Catálogo de Plantas das Unidades de Conservação do Brasil**. Jardim
835 Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://catalogo-uics-brasil.jbrj.gov.br>. Acesso em: 16 abr. 2024.
- 836 Meyer, G. E.; Hindman, T. W.; Lakshmi, K. Machine vision detection parameters for plant species identification,
837 in: Meyer, G.E., DeShazer, J.A. (Eds.). **Precision Agriculture and Biological Quality**, v. 3543, p. 327-335,
838 1998.
- 839 Murphy, P. G.; Lugo, A. E. "Ecology of tropical dry forest". *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, v. 17, p. 67-88. 1986.
- 840 Pereira, J. E. S.; Barreto-Garcia, P. A. B.; Paula, A.; Lima, R. B.; Carvalho, F. F.; Nascimento, M. S.; Aragão, M.A.
841 Form quotient in estimating caatinga tree volume. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 40, p. 508-517, 2020.
- 842 Queiroz, L. P.; Cardoso, D.; Fernandes, M.; Moro, M. "Diversity and evolution of flowering plants of the Caatinga
843 domain". In: da Silva, J. C.; Leal, I.; Tabarelli, M. (eds.), **Caatinga: the largest tropical dry forest region in**
844 **South America**. Cham: Springer, p. 23-63. 2017.
- 845 R Development Core Team 2019, **R: a language and environment for statistical computing**, R Foundation for
846 Statistical Computing, Vienna, 2019.
- 847 RMFC. **Rede de Manejo Florestal da Caatinga**. Protocolo de medições de parcelas permanentes. Associação de
848 Plantas do Nordeste, 2005. Disponível em:
849 https://www.academia.edu/7891824/Protocolo_de_Medi%C3%A7%C3%B5es_da_Rede_de_Manejo_Flores
850 [tal_da_Caatinga](https://www.academia.edu/7891824/Protocolo_de_Medi%C3%A7%C3%B5es_da_Rede_de_Manejo_Flores). Acesso em: 11 jan. 2025.
- 851 Rouse, J. W.; Hass, R. H.; Schell, J. A.; Deering, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with
852 ERTS. In: 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium (pp. 309-317). Washington: NASA. 1973.
- 853 Santos, C. V. B.; Carvalho, H. F. S.; Silva, M. J.; Moura, M. S. B.; Galvêncio, J. D. Uso de Sensoriamento Remoto
854 na análise da temperatura da superfície em áreas de floresta tropical sazonalmente seca. **Revista Brasileira**
855 **de Geografia Física**, v. 13, n. 03, p. 941-953, 2020.
- 856 Shapiro, S. S.; Wilk, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n.
857 3/4, p. 591-611, 1965.
- 858 Silva, A. G.; Vilar, L. O.; Vilar, V. O.; Coelho, F. P.; Acioli, N. R. S.; Ramos, R. B. G. A.; Moreira, J. G.; Diores,
859 T. R.; Silva, D. F.; Cruz, M. S.; Moura, R. G. O Manejo Florestal Sustentável da Caatinga. **Revista Ibero-**
860 **Americana de Humanidades**, Ciências e Educação, v. 7, n. 5, 2021.
- 861 Silva, M. H.; Elias, A. R.; Rosário, L. L. Análise da cultura da soja a partir de índices de vegetação (ExG–GLI–
862 TGI–VEG) advindos de imagens RGB obtidas com ARP. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 10, n. 2, p.
863 140-154, 2022.
- 864 Souza, D. D.; Cavalcante, N. B. Biometria de frutos e sementes de *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill.
865 (Euphorbiaceae). **Acta Biológica Catarinense**, v. 6, n. 2, p. 115-122, 2019.
- 866 Souza, D. D.; Cavalcante, N. B. Biometria de frutos e sementes de *Jatropha mollissima* (Pohl) Baill.
867 (Euphorbiaceae). **Acta Biológica Catarinense**, v. 6, n. 2, p. 115-122, 2019.
- 868 Tabarelli, M.; Leal, I. R.; Scarano, F. R.; Silva, J. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade.
869 **Ciência e cultura**, v. 70, n. 4, p. 25-29, 2018.
- 870 Teixeira, M.; Berra, E. F.; Mallmann, A. A.; Kruchelski, S. Análise temporal de índices de vegetação como subsídio
871 à estimativa de biomassa acima do solo em iLPF. **Entorno Geográfico**, n. 27, p. e23013100-e23013100, 2024.
- 872 Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of**
873 **Environment**, v. 8, 127-150, 1979.

- 874 Tucker, H. **A short graduate course in nonparametric statistical inference**, University of California. 1984.
- 875 Wadsworth, M. W., **Handbook of Statistical Methods for Engineers and Scientists**, McGraw-Hill Publishing
876 Company. 1990.
- 877 Wuebbecke, D. M.; Meyer, G. E.; Von Bargen, K.; Mortensen, D. A. Color indices for weed identification under
878 various soil, residue and lighting conditions. **Transactions of the ASAE**, v. 38, 259-269, 1995.

3 CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados desta pesquisa para a área experimental na Floresta Nacional Contendas do Sincorá demonstraram que a mesma se encontra em processo de recuperação após oitos anos da implantação das parcelas permanentes, visto que o tratamento Testemunha (T) não diferiu do Corte Seletivo por Espécie (CSE) e este não diferiu do Corte Seletivo por Diâmetro Mínimo (CSDAP).

Diferentes índices espectrais se destacaram neste trabalho. Tal fato evidencia a importância de conhecer o ambiente em estudo e como se dá o comportamento vegetacional ao longo do ano, pois essas particularidades influenciam diretamente na captura pelos sensores das respostas dos objetos, sejam de satélites ou drones.

O modelo Random Forest (RF) promoveu os melhores resultados ao correlacioná-los com os índices espectrais na estimativa dos parâmetros florestais (volume e biomassa florestal). Isto ressalta o poder de aplicação de modelos de aprendizagem de máquina, quando relacionados com dados espaciais.

De maneira geral, os métodos de estimativa de volume e biomassa florestal aplicados neste estudo foram eficientes e representam um avanço da temática, contribuindo com conhecimentos importantes em áreas de florestas secas, especificamente a Caatinga, que necessita de pesquisas que proporcionem novas metodologias com resultados promissores e com menor impacto ambiental, sobretudo no cenário de mudanças climáticas.

4 REFERÊNCIAS

AZEVEDO, L. S.; BARBOSA, L. C. Estudo do índice de vegetação e temperatura da superfície terrestre na área de proteção ambiental Triunfo do Xingu (PA) utilizando o Google Earth Engine. **Rev. Geociênc. Nordeste**, v. 6, n. 2, p. 244-256, 2020.

BARBOSA, H. A.; Flash drought and its characteristics in Northeastern South America during 2004–2022 using satellite-based products. **Atmosphere**, v. 14, n. 1629, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14111629>

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima/Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 507, de 18 de julho de 2024 - resolução CONAMA nº 507, de 18 de julho de 2024**. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=828. Acesso em: 20 jan. 2025.

BERTOLIN, N. O.; FILGUEIRAS, R.; VENANCIO, L. P.; MANTOVANI, E. C. Predição da produtividade de milho irrigado com auxílio de imagens de satélite. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1627-1638, 2017.

CAETANO, R.; SILVA, T. B.; BENFICA, N. S.; CASTRO, D. R. Uso de índices espectrais na caracterização da cobertura vegetal em região de Caatinga do Semiárido Baiano. **Rev. Geociênc. Nordeste**, v. 8, n. 2, p. 28-43, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/26864>. Acesso: 5 set. 2023.

CASTRO, R. V. O.; ARAÚJO, R. A. A.; LEITE, H. G.; CASTRO, A. F. N. M.; PEREIRA, R. S.; LEAL, F. A. Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. **Revista Árvore**, v. 40, n. 1, p. 107-116, 2016.

CHAVES, I. B.; FRANCISCO, P. R. M.; LIMA, E. R. V.; CHAVES, L. H. G. Modelagem e mapeamento da degradação da caatinga. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 183-195, 2015.

COSTA, A.C. 2022. **Predição da biomassa usando redes neurais artificiais e sensoriamento remoto em florestas na Amazônia**. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Publicação PPGEFL.DM-06/2022. Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 66p.

DAI, P. V. S.; BAILO, F. H. R.; AZEVEDO, G. B.; FAGUNDES, L. A.; TRENTO, A. C. S. Estimativa de volume de madeira baseada em índices de vegetação. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 129, p. e3301, 2021. <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n129.06>

ELOY, E. **Quantificação e caracterização da biomassa florestal em plantios de curta rotação**. v. 4, n. 21, p. 31-33, 2013.

FRANCISCO, P. R. M.; CHAVES, I. B.; CHAVES, L. H. G.; LIMA, E. R. V.

Estimativa da degradação da biomassa da vegetação de Caatinga através de índices de vegetação. **Polêmica**, v. 12, n. 2, 2013.

FIGUEIREDO, S. M. M.; FIGUEIREDO, E. O. Modelagem de distribuição de espécies arbóreas por classe diamétrica no sudoeste da Amazônia. **Sci. For.**, v. 47, n. 124, p. 644-654, dez. 2019.

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga**. Ministério do Meio Ambiente. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 2010.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. Tradução: EPIHANIO, J. C. N. (coord.) [et. al]. São José dos Campos, Parêntese, 2009.

JIANG, Z.; HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. **Remote Sensing of Environment**, v.112, p.3833-3845, 2008.

KUMAR, V.; SHARMA, A.; BHARDWAJ, R.; THUKRAL, A. K. Comparison of different reflectance indices for vegetation analysis using Landsat-TM data. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 12, p. 70-77, 2018.

https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2018RSASE..12...70K/doi:10.1016/j.rsase.2018.10.013

LEDA, V. C.; GONÇALVES, A. K.; LIMA, N. S. Sensoriamento remoto aplicado a modelagem de produtividade da cultura da cana-de-açúcar. **Energia na Agricultura**, v. 34, n. 2, p. 263-270, 2019.

LIMA, R. B.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PAULA, A.; PEREIRA, J. E. S.; CARVALHO, F. F.; GOMES, S. H. M. Improving wood volume predictions in dry tropical forest in the semi-arid Brazil. **Science Press**, 2020.

LOPES, R. J. C.; SANTOS, A. M.; ZLATAR, T. LIMA JÚNIOR, C. Uso de índices de vegetação por sensoriamento remoto para estudos da Caatinga: uma revisão sistemática. **GAIA SCIENTIA**, v. 14, n. 1, p. 104-116, 2020.

LUZ, L.R.; GIONGO, V.; SANTOS, A. M.; LOPES, R. J. C.; LIMA JÚNIOR, C. Biomass and vegetation index by remote sensing in different Caatinga forest areas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 52 n. 2, p. e20201104, 2022.

MATA NATIVA, **O que é manejo florestal?** Mata Nativa, 2019. Disponível em: <https://www.matanativa.com.br/manejo-florestal-sustentavel/>. Acesso em: 21 set. 2023.

MARAGON, G. P.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A.; SCHNEIDER, P. R. LOUREIRO, G. H. Modelagem da distribuição diamétrica de espécies lenhosas da Caatinga, semiárido pernambucano. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 3, p. 863-874, 2016.

MAESTRI, R.; SANQUETTA, C. R.; SCOLFORO, J. R.; MACHADO, S. A.; Corte, A. P. D. Modelagem do crescimento florestal considerando variáveis do ambiente: revisão. **Scientia Agraria**, v. 14, n.3, p. 103-110, 2013.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Editora: Unb. Brasília, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/TatiAlmeida/publication/332292728_INTRODUCAO_AO_PROCESSAMENTO_DE_IMAGENS_DE_SENSORIAMENTO_REMOTO/links/5cac8190a6fdccf47828f335/INTRODUCAO-AO-PROCESSAMENTO-DE-IMAGENS-DE-SENSORIAMENTO-REMOTO.pdf. Acesso em: 5 set. 2023.

MIGUEL, E. P.; REZENDE, A. V.; LEAL, F. A.; MATRICARDI, E. A. T.; VALE, A. T.; PEREIRA, R. S. Redes neurais artificiais para a modelagem do volume de madeira e biomassa do cerradão com dados de satélite. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 9, p. 829–839, 2015.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Manejo sustentável dos recursos florestais da Caatinga** / Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Departamento de Florestas. Programa Nacional de Florestas. Unidade de Apoio do PNF no Nordeste. Natal: MMA, 2008. 28p. Disponível em: <https://moodle.ufsc.br/mod/resource/view.php?id=1141217>. Acesso em: 23 set. 2023.

MIRANDA, K. F.; AMARAL NETO, M.; SOUSA, R. D. P.; COELHO, R. D. F. Manejo Florestal Sustentável em Áreas Protegidas de uso comunitário na Amazônia. **Sociedade & Natureza** v. 32, p. 799-814, 2022.

PARIZOTTO, A.; MUSSIO, C. F.; RUIZ, E. C. Z.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N. Florística e diversidade da regeneração natural em clareiras em Floresta Ombrófila Mista. Trabalho apresentado no **V Seminário de Atualização Florestal**, Irati-PR. 2019. <http://dx.doi.org/10.4336/2019.pfb.39e201801711>

PAREYN, F. G. C. Os Recursos Florestais Nativos e a sua Gestão no Estado de Pernambuco – O Papel do Manejo Florestal Sustentável. In: Brasil, Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da Caatinga** / Maria Auxiliadora Gariglio... [et al.], organizadores. _ Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, 368p.: 2010.

PEREIRA, J.E.S.; BARRETO-GARCIA, P.A.B.; PAULA, A.; LIMA, R.B.; CARVALHO, F.F.; NASCIMENTO, M.S.; ARAGÃO, M.A. Form quotient in estimating caatinga tree volume. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 40, p. 508-517, 2020. <https://doi.org/10.1080/10549811.2020.1779090>

PONZONI, J. F.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da Vegetação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

RABELO, D. R. Degradação ambiental decorrente do uso e ocupação do solo no município de Junco do Seridó, PB. **Revista Pensar Geografia**, v. 5, n. 2, p. 139-

148. 2021. Disponível em: <http://periodicos.apps.uern.br/index.php/PGEO/article/view/3741>. Acesso em: 21 set. 2023.

RATUCHNE, L. C.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; SCHAMNE, P. A. **Estado da Arte na Quantificação de Biomassa em Raízes de Rede de Manejo Florestal da Caatinga (RMFC)**: Protocolo de medições de parcelas permanentes / Comitê Técnico Científico. - Recife: Associação Plantas do Nordeste, 21 p.: 2005. 2016.

RIBEIRO, G. N.; FRANCISCO, P. R. M.; MORAIS NETO, J. M.; ARAGÃO, K. P. Análise temporal da vegetação de caatinga utilizando NDVI. **Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior - ABEAS** - v. 29, n. 1, p. 3-6, 2014.

SANQUETTA, C. R.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D; SIMON, A.; PSCHEIDT, H.; RUZA, M. S.; MOCHIUTTI, S. Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Florestalis**, v. 42, n. 103, p. 361–370, 2014.

SANTOS, P. R.; VASCONCELOS, G. S.; LIMA, B. L. C.; OLIVEIRA, D. A. S.; FELINTO, A. C.; SANTOS, C. G. ONG na produção de mudas no semiárido de Pernambuco: uma busca pela recuperação ambiental. **Revista Ambientale**, Universidade Estadual de Alagoas/UNEAL, vol.10, n. 3, 2018. Disponível em: <https://periodicosuneal.emnuvens.com.br/ambientale/article/view/59#:~:text=Diante%20do%20exposto%20pode%2Dse,lbimirim%20e%20semi%C3%A1rido%20de%20Pernambuco>. Acesso em: 21 set. 2023.

SANTOS, H. K. V.; LIMA, R. B.; SOUZA, R. L. F.; CARDOSO, D.; MOONLIGHT, P. W.; SILVA, T. T.; OLIVEIRA, C. P.; ALVES JÚNIOR, F. T.; VEENENDAAL, E.; QUEIROZ, L. P.; RODRIGUES, P. M. S.; SANTOS, R. M.; SARKINEN, T.; PAULA, A.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PENNINGTON, T.; PHILLIPS, O. L. Spatial distribution of aboveground biomass stock in tropical dry forest in Brazil. **IForest**, v. 16, n. 2, p. 116–126, 2023. <https://doi.org/10.3832/ifor4104-016>

SANTANA, S. H. C.; SILVA, E. R. A. C.; LAURENTINO, M. L. S.; MELO, J. G. S.; GALVÍNCIO, J. D. Identificação dos índices de vegetação com melhores respostas espectrais para a Mata Atlântica na cidade de São Paulo-SP. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 3 n. 2, p. 200-209, 2018.

SILVA, A. G.; VILAR, L. O.; VILAR, V. O.; COELHO, F. P.; ACIOLI, N. R. S.; RAMOS, R. B. G. A.; MOREIRA, J. G.; DIARES, T. R.; SILVA, D. F.; CRUZ, M. S.; MOURA, R. G. O Manejo Florestal Sustentável da Caatinga. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**. São Paulo, v. 7, n. 5, 2021.

SOUZA, D. D. **Adaptações de plantas da Caatinga**. Editora Oficina de textos, 2020.

SOUZA, M. P.; ALVES, A. R., BAKKE, I. A.; LOPES, J. A.; SANTOS, W. S.; FERNANDO, E. M. P. Banco de sementes do solo de Caatinga submetida a

plano de manejo florestal sustentável em Cuité-PB. **Scientia Forestalis**, v. 49, n. 130, p. e3494. 2021.

VIRGENS, A. P.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PAULA, A.; CARVALHO, F. F.; ARAGÃO, M. D. A.; MONROE, P. H. M. Biomassa de espécies florestais em área de Caatinga arbórea. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 92, p. 555-561, 2017. <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.92.1465>

WATZLAWICK, L.F.; KIRCHNER, F.F.; SANQUETTA, C.R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, v.19, p.169-181, 2009.