



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ECONOMIA ECOLÓGICA

ERIKA KIRSTEN DOBE

**EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASSA E CARBONO
ESTOCADO NA FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA DO CEARÁ,
NORDESTE DO BRASIL**

FORTALEZA

2022

ERIKA KIRSTEN DOBE

**EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASSA E CARBONO
ESTOCADO NA FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA DO CEARÁ,
NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Economia Ecológica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Economia Ecológica.

Orientador: Prof. Dr. Guillermo Gamarra Rojas.
Coorientador: Dr. Francisco Carlos Barboza Nogueira

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- D662e Dobe, Erika Kirsten.
Equações alométricas para estimar biomassa e carbono estocado na floresta tropical sazonalmente do Ceará, Nordeste Brasil / Erika Kirsten Dobe. – 2022.
47 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Curso de Economia Ecológica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Guillermo Gamarra Rojas.
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Carlos Barboza Nogueira.
1. Vegetação do semiárido. 2. Aquecimento global. 3. Alometria de plantas. 4. Biomassa florestal. I. Título.

CDD 577

ERIKA KIRSTEN DOBE

**EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS PARA ESTIMAR BIOMASSA E CARBONO
ESTOCADO NA FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA DO CEARÁ,
NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Economia Ecológica da
Universidade Federal do Ceará, como requisito
parcial à obtenção do título de Bacharel em
Economia Ecológica.

Aprovada em: 08/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Guillermo Gamarra Rojas (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Francisco Carlos Barboza Nogueira (Coorientador)
Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais IBAMA

Prof. Dr. Carlos Américo Moreira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profa. Dra. Isabel Cristina da Silva Araújo
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus filhos, Vitor, Erik e Alex.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao Prof. Dr. Francisco Carlos Barboza Nogueira, por sua generosidade com seu tempo, conhecimento e pela força da amizade durante todo o trajeto da minha graduação.

Ao meu orientador Guillermo Gamarra-Rojas e aos participantes da banca examinadora Prof. Dr. Carlos Américo Moreira e Profa. Dra. Isabel da Silva Araújo pelo interesse, pelas valiosas contribuições e sugestões.

A cada um dos colegas da Economia Ecológica, pelo carinho, pelas aventuras, pelas amizades, até pelas brigas. Ao Jerônimo Barroso Silva Filho, colega de campo e amigo, pela parceria na coleta de amostras e dados no campo e na construção do trabalho. Agradecimento especial para Germana Batista e Thiago Parente, que me deram forças quando eu não tinha mais nenhuma própria sobrando, e que sempre acreditaram em mim.

Sou grata aos proprietários da Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN Fazenda Não me Deixes e da RPPN Arizona, Flávio de Queiroz Salek e Daniel Queiroz Salek, por permitirem a realização da pesquisa nas áreas das Unidades de Conservação. Ao Aldemir Silva, o querido “Guidinha” que cuidou tão bem da equipe na Não me Deixes. Da mesma forma, agradeço à Maria Kelliany dos Santos e sua família toda que abriram as portas da casa e do coração para mim e permitiram a coleta dos dados dendrométricos no Assentamento Lagoa de Dentro, e a seu pai Edval Agostinho dos Santos pelo auxílio na coleta dos dados de campo. Também agradeço a gerente da Fazenda Normal, de propriedade da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ceará – EMATER/CE, Evanira Fraga, por autorizar a coleta de dados na fazenda.

Ao Engenheiro agrônomo Luis Wilson Lima-Verde, pesquisador nas áreas de Taxonomia e Florística de Fanerógamas pela revisão e correção dos nomes científicos das espécies florestais estudadas. Também agradeço ao coordenador Estadual de Prevenção e Combate aos Incêndios Florestais-PREVFOGO/IBAMA/CE, Kurtis François Teixeira Bastos, por ceder o brigadista Adriano Eudócio Barbosa para auxiliar na coleta de dados das espécies florestais na RPPN Fazenda Não me Deixes. Especial agradecimento ao Professor Alek Sandro Dutra por ceder as instalações do Laboratório de Análise de Sementes – LAS, do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal do Ceará – UFC, para análise do material coletado em campo.

E por fim, aos meus amados filhos, que me entenderam.

“A thing is right when it tends to preserve the integrity, stability and beauty of the biotic community. It is wrong when it tends otherwise.”

“Algo é correto quando tende a preservar a integridade, estabilidade e beleza de uma comunidade biótica. Caso contrário, é errado.” (LEOPOLD, 1949, p.242).

RESUMO

As Florestas Tropicais Sazonalmente Secas – FTSS são relevantes compartimentos do ciclo do Carbono. A estimativa do sequestro de Carbono nessas florestas pode contribuir para implantação de projetos de redução do aquecimento global, além de contribuir para a conservação desses ecossistemas. Equações alométricas são ferramentas úteis para quantificar a biomassa florestal e estimar o estoque de Carbono nas FTSS. Este estudo utilizou o método semi-destrutivo com o objetivo de desenvolver equações alométricas multi-espécies de árvores e obter a melhor equação para estimar a biomassa acima do solo e o estoque de Carbono. As medidas foram realizadas em 149 árvores em 4 áreas de vegetação preservada da Caatinga, localizadas nos municípios de Itapipoca, Quixadá e Quixeramobim, no estado do Ceará. Cada indivíduo teve altura, diâmetro do tronco e dos galhos medidos. Alíquotas de folhas e galhos finos foram coletadas. O volume da alíquota dos galhos foi utilizado para cálculo da densidade da madeira. No total, dez equações alométricas foram desenvolvidas para espécies mistas. A equação alométrica representada pelo modelo 1: $AGB = 1.274 * (D)^{1.876} * (\rho)^{1.273}$ foi a que obteve os melhores resultados das estatísticas de qualidade do ajuste (R^2 -adj = 0.845, RSE = 0.547, AIC = 248.073, e $p < 0.000$). A biomassa acima do solo das 149 árvores da Floresta Tropical Sazonalmente Seca do Nordeste do Brasil é estimada em 21.6 t de biomassa acima do solo, enquanto a estimativa para o Carbono fixado na biomassa arbórea é de 10.15 t-C. A aplicação dessa equação em outras áreas da floresta da Caatinga, com espécies arbóreas e arbustivas semelhantes, poderá ajudar a validar a precisão do modelo.

Palavras-chave: vegetação do semiárido, aquecimento global, alometria de plantas, biomassa florestal.

ABSTRACT

Seasonally dry tropical forests – SDTFs represent an important compartment of the carbon cycle. Estimating Carbon sequestration in these forests can contribute to the implementation of global warming reduction projects, in addition to contributing to the conservation of these ecosystems. Allometric equations developed to quantify forest biomass are useful for assessing the carbon stores in these forests. Utilizing the semi-destructive method, this study aimed to develop multispecies allometric equations for trees in the Caatinga and obtain the best equation for estimating aboveground biomass and the Carbon stores. Measurements were taken for 149 trees in areas of preserved Caatinga vegetation, located in the municipalities of Itapipoca, Quixadá and Quixeramobim, in the state of Ceará. Each individual's height, stem diameter and branches measured. Leaf and small branch aliquots were collected. Branch aliquot volume was utilized to calculate wood density. In total, ten mixed-species allometric equations were developed. The equation $AGB = 1.274 * (D)^{1.876} * (\rho)^{1.273}$ obtained the best goodness-of-fit statistics (R^2 -adj = 0.845, RSE = 0.547, AIC = 248.073, and $p < 0.000$). The aboveground biomass of the 149 trees from the SDTF of the Northeast of Brazil is estimated at 21.6 t, while the estimate of Carbon fixed in the tree biomass is 10.15 t-C. The application of the equation in other areas of the Caatinga forest, with similar shrub and tree species, can help validate the precision of the model.

Keywords: semiarid vegetation, global warming, plant allometry, forest biomass

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa da localização das Fazendas Lagoa de Dentro, Normal, Não Me Deixes e Arizona, escolhidas para coletar os dados dendrométricos, estado do Ceará, Brasil.....	18
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 – Distribuição diamétrica de 149 indivíduos adultos na Floresta Tropic
Sazonalmente Seca localizada no estado do Ceará25
- Gráfico 2 – Nuvem de pontos da biomassa seca em função do diâmetro (cm), altura (m)
e densidade da madeira (g cm^{-3}) de 149 indivíduos adultos na FTSS
localizada no estado do Ceará, Brasil26
- 3 – Nuvem de pontos (dados transformados logaritmicamente) de biomassa
seca total (kg) em função do diâmetro na altura do peito (D, cm), altura da
árvore (H, m) e densidade da madeira (WD) (g cm^{-3}) para os 149 indivíduos
das multiespécies.....27
- Gráfico 4 – Gráficos dos resíduos em função dos valores previstos (à esquerda) e gráfico
quantil-quantil (à direita) dos resíduos da regressão linear simples de
 $\ln(\text{AGB})$ com relação a $\ln(D)$ referentes a todos os modelos.....29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Espécie, família, nome comum, número de indivíduos avaliados e densidade da madeira da Floresta Tropical Sazonalmente Seca, Ceará, Brasil.....	24
Tabela 2	– Resumo estatístico das principais variáveis dendrométricas.....	26
Tabela 3	– Modelos ajustados para prever AGB de espécies mistas na floresta tropical sazonal seca brasileira, Ceará, Brasil.....	28
Tabela 4	– Paired Samples Test e tamanho do efeito do modelo local (modelo 1) em relação aos modelos disponíveis na literatura (n = 149)	32

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
FTSS	Floresta Tropical Sazonalmente Seca
BD	Diâmetro na Base (<i>Basal Diameter</i>)
AGB	Biomassa Acima do Solo (<i>Aboveground Biomass</i>)
H	Altura (<i>Height</i>)
WD	Densidade da madeira (<i>Wood Density</i>)
D	Diâmetro a Nível de Peito

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade da madeira
%	Porcentagem
α	Alfa
β	Beta
Σ	Soma

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1	Características das áreas	15
2.2	Coleta de dados e método de amostragem	18
2.3	Medição das variáveis dendrométricas	19
2.4	Medição da biomassa seca aparada e não aparada	20
2.5	Cálculo da biomassa	20
2.5.1	<i>Medição da biomassa fresca não aparada</i>	20
2.5.2	<i>Cálculos</i>	21
2.5.3	<i>Cálculo da biomassa aparada</i>	21
2.5.4	<i>Cálculo da biomassa não aparada</i>	21
2.6	Análise dos dados e seleção dos modelos	22
2.7	Comparação com outros modelos da literatura	23
2.8	Estoque de carbono	23
3	RESULTADOS	24
3.1	Comparação do modelo local com modelos alométricos da literatura	32
3.2	Estoque de carbono	32
4	DISCUSSÃO	33
4.1	Avaliação das espécies florestais e desenvolvimento dos modelos alométricos	33
4.2	Comparação com os modelos da literatura	36
4.3	Alometria no contexto de aquecimento global	37
5	CONCLUSÃO	38
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

A Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS) do Nordeste do Brasil compõe um grande sistema regional formado por fauna e flora adaptadas às restrições hídricas, climáticas e edáficas predominantes. Sua área *core* é representada por uma vegetação conhecida localmente por Caatinga, composta por árvores que raramente atingem 20 metros de altura e arbustos adaptados ao clima semiárido, quente e seco, marcadamente sazonal (IBGE, 2004; ARAÚJO et al., 2007). A Caatinga possui diversas fitofisionomias distribuídas em uma ampla faixa edáfica e climática (OLIVEIRA et al., 2019).

Historicamente considerada pobre, improdutiva, inóspita, e devido às secas recorrentes, a região da Caatinga foi bastante negligenciada pela política pública desde o início da colonização do Brasil (SILVA et al., 2017). É a região semiárida mais populosa do mundo, com 28,6 milhões de habitantes de acordo com o censo de 2010, equivalente a 14,5% da população brasileira. A região sofre uma pressão antrópica intensa – estima-se que em torno de 60% da vegetação já foi perturbada. A Caatinga é frequentemente cortada para uso do solo na agricultura semi-itinerante. A pressão é ainda mais significativa por causa da pobreza da maioria da população que habita a região, que leva à utilização da madeira como combustível e como fonte de renda (FIGUEIRÔA et al., 2006; ARAÚJO FILHO et al., 2018; RAMOS et al., 2008). Por esses motivos, se estima uma perda entre 30.4% a 51.7% do habitat da Caatinga (CASTELLETTI et al., 2004; LEAL et al., 2005). Esse fato representa uma ameaça adicional à biodiversidade (OLIVEIRA et al., 2012). Vale destacar também que no Brasil, 62% das áreas sujeitas a desertificação estão na Caatinga (SANTOS et al., 2014).

As projeções sobre mudanças climáticas apontam para o aumento da aridez nos ecossistemas semiáridos (IPCC, 2013). Quando consideramos todos os tipos de áreas secas ao redor do Planeta, as FTSS compõem 41% da superfície terrestre e abrigam aproximadamente 38% da população mundial (GARIGLIO et al., 2010; SANTOS et al., 2014). Além desta importância econômica e social, as FTSS são uma fonte considerável de armazenamento de Carbono (GIBBS et al., 2007; HARRIS et al., 2012; MENDES et al., 2020). Estima-se que há uma parcela relevante (equiparável nos estoques acima e abaixo do solo) de sequestro de Carbono de espécies de floresta remanescente de Caatinga que pode contribuir para estimular a implementação de projetos de mitigação do aquecimento global, fomentando ações de conservação florestal e de práticas sustentáveis de agricultura (MENEZES et al., 2021), bem como para avaliar o balanço e a eficiência energética em ecossistemas manejados do semiárido (MATIAS et al., 2022).

A velocidade na qual as mudanças climáticas estão ocorrendo põe em perigo a biodiversidade do Planeta (IPCC, 2013). A mitigação da emissão de CO₂ para a atmosfera pode ser alcançada pela redução de desmatamentos, não uso do fogo e pela conservação das florestas através da criação de um maior número de áreas protegidas no curto prazo (SANTOS et al., 2014).

Nesse sentido, o estabelecimento de áreas protegidas na Caatinga poderia garantir um razoável grau de preservação das espécies e salvaguardar os serviços ambientais desse ecossistema brasileiro, porém apenas 1% da Caatinga está protegida por unidades de conservação de proteção integral. Em relação às Reservas Particulares do Patrimônio Natural—RPPNs, elas protegem apenas 0,08% do território da Caatinga (LEAL et al., 2005; HAUFF 2010; OLIVEIRA et al., 2012). Outra questão crítica é que as Unidades de Conservação oferecem proteção precária por falta de pessoal e recursos para sua gestão (PACHECO et al., 2018).

É possível avaliar o carbono estocado na biomassa acima do solo de uma floresta através da aplicação de equações alométricas (PICARD et al., 2012; HENRY et al., 2013). Para tanto, é necessário alometria local e dados a nível de árvore, que geralmente pode ser encontrado em levantamentos florestais (BROWN et al., 1989; TEOBALDELLI et al., 2009). To estimate biomass or volume of aboveground components of trees, allometric equations based on different independent variables, such as diameter, height, and wood density, are utilized (CHAVE et al., 2014).

Há pouca informação quanto ao potencial de produção de biomassa e ao estoque de Carbono estimados através de modelos alométricos para a Caatinga. As equações alométricas pantropicais para estimar a biomassa acima do solo e o Carbono têm limitações regionais e podem enviesar a estimativa quando utilizadas em áreas com clima e vegetação diferentes.

Objetivo: Desenvolver equações alométricas multi-espécies de árvores e obter a melhor equação alométrica para estimar a biomassa acima do solo e o estoque de Carbono para a Floresta Tropical Sazonalmente Seca do Nordeste do Brasil.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Características das áreas

O local do estudo fica na região nordeste do Brasil, no estado do Ceará. Foram escolhidas quatro áreas em três municípios, definidas em função do estado de conservação da

vegetação nas áreas, conforme descrição a seguir:

Área 1 - Fazenda Lagoa de Dentro, com área de 1149,74 hectares. A fazenda está localizada no município de Itapipoca, com as seguintes Coordenadas Geográficas: Latitude - 03°15'12.16" S e Longitude - 39°40'49.3" W (Fig. 1). A fazenda foi transformada em assentamento de trabalhadores rurais pelo Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – INCRA. O clima do município de Itapipoca é classificado como Tropical Quente Semiárido e Tropical Quente Semiárido Brando, com pluviosidade média anual de 1130.40 mm, concentrada nos meses de janeiro a maio, com estiagem expressiva entre 4 a 6 meses, e temperatura média de 26 °C a 28 °C (IPECE, 2017a). A área apresenta altitude de 50 m acima do nível do mar, localizada em um tabuleiro próximo à costa litorânea típico de uma superfície de deposição de sedimentos, pouco litificada, com predomínio de processos de pedogênese e formação de solos espessos, arenosos e areno-argilosos, e bem drenados. Os Neossolos Quartzarênicos, Latossolos e Argissolos são as três classes de solos mais comuns na área. A cobertura florestal é representada por florestas estacionais semidecíduas (IPECE, 2017a; CPRM, 2018).

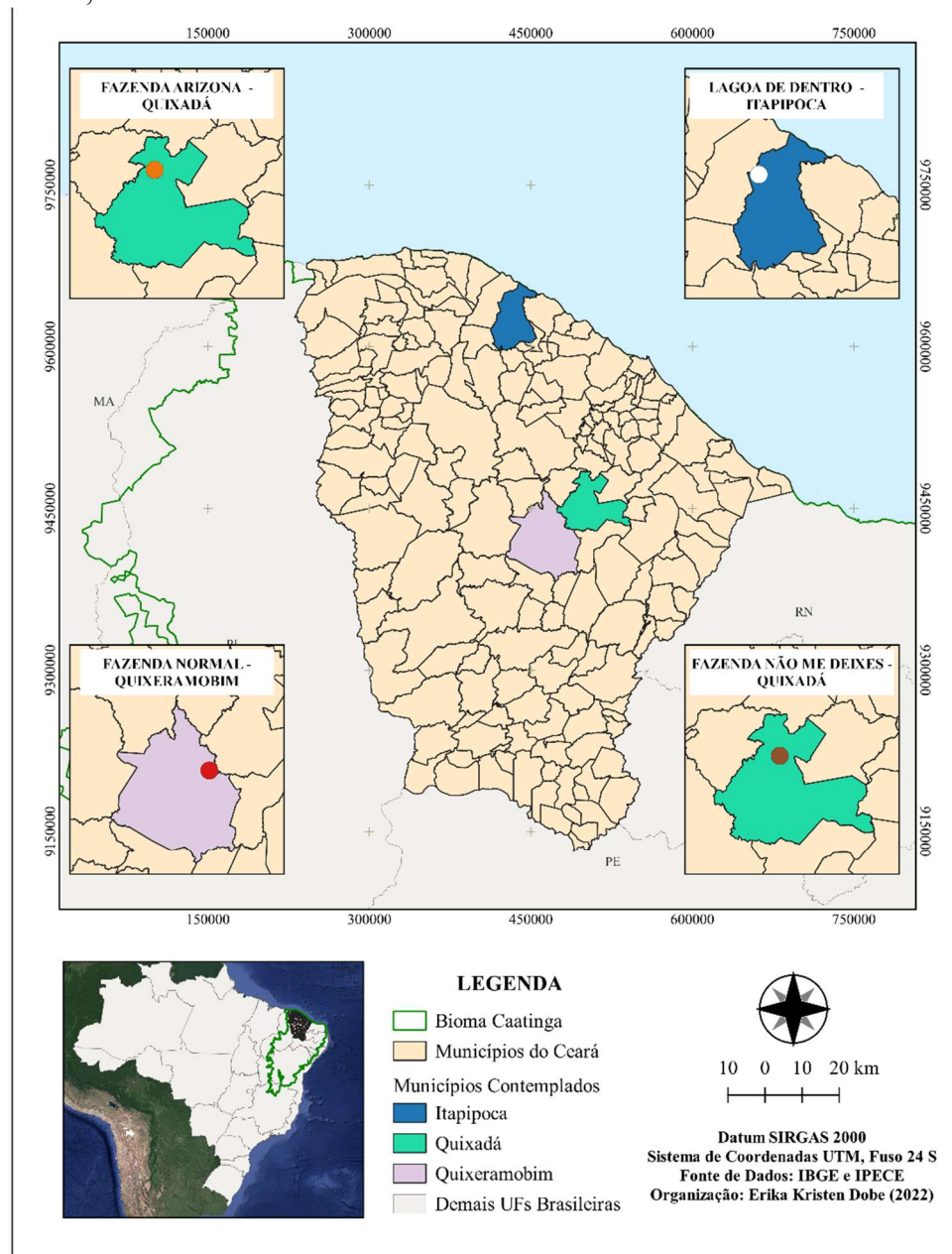
Área 2 – Unidade de Conservação denominada Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Fazenda Não Me Deixes, município de Quixadá, com as seguintes Coordenadas Geográficas: latitude - 04°49'34" S e longitude - 38°58'9" W. A Fazenda Não Me Deixes possui área total de 928 hectares. No ano de 1998, 300 ha da fazenda foram transformados em Unidade de Conservação, em caráter perpétuo pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. O clima do município de Quixadá é classificado como Tropical Quente Semiárido com inverno seco e verão chuvoso - BSh de Köppen-Geiger, com pluviosidade média anual de 731 mm, concentrada nos meses de janeiro a junho (FUNCEME, 2020). A temperatura anual média é de 28,2 °C, a média das máximas é 33,4 °C e a média das mínimas é 22,9 °C (INMET, 2020). A insolação anual é de 3.143,8 h, com a menor registrada em março (216,5 h/mês) e a maior em outubro (368,1 h/mês) (EMBRAPA, 2004). A geologia da área de estudo está inserida no Complexo Ceará - Unidade Canindé: paragnaisses em níveis distintos de metamorfismos-migmatização, incluindo ortognaisses ácidos, rochas metabásicas, gnaisses dioríticos, metagabros, metaultramáficas, quartzitos e metacalcários (IPECE, 2017b; CPRM, 2020). Os recursos hídricos presentes na fazenda são três lagoas naturais, um lago artificial (açude) e pequenos córregos intermitentes. A cobertura florestal é representada por vegetação de Caatinga arbórea caducifólia espinhosa. A área apresenta altitude de 210 m acima do nível do mar, com topografia expressivamente aplainada típica de superfícies elaboradas por processos de pediplanação impostos pelas

condições de semiaridez mais rigorosas. Os Luvisolos e Argissolos são as duas classes de solos mais comuns na área (ASA BRANCA, 2012).

Área 3 – Unidade de Conservação denominada Reserva Particular do Patrimônio Natural Fazenda Arizona, também localizada no município de Quixadá, com as seguintes Coordenadas Geográficas: latitude 05°07'24,22" S e longitude 39°10'58,44" W e altitude de 250 m acima do nível do mar. A Fazenda Arizona possui área total de 405 hectares e em 2013, 216,70 hectares da fazenda foram transformados em RPPN. O clima do município de Quixadá é classificado como Tropical Quente Semiárido com inverno seco e verão chuvoso - BSh de Köppen-Geiger, com pluviosidade média anual de 731 mm, concentrada nos meses de janeiro a junho (FUNCEME, 2020). A temperatura anual média é de 28,2 °C, a média das máximas é 33,4 °C e a média das mínimas é 22,9 °C (INMET, 2020). A insolação anual é de 3.143,8 h, com a menor registrada em março (216,5 h/mês) e a maior em outubro (368,1 h/mês) (EMBRAPA, 2004). A geologia da área de estudo está inserida no Complexo Ceará - Unidade Canindé: paragnaisses em níveis distintos de metamorfismos-migmatização, incluindo ortognaisses ácidos, rochas metabásicas, gnaisses dioríticos, metagabros, metaultramáficas, quartzitos e metacalcários (IPECE, 2017b; CPRM, 2020).

Área 4 - Fazenda Normal, com área de 1507,65 hectares, localizada no município de Quixeramobim, Ceará, de propriedade da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Ceará – EMATER/CE, com as seguintes Coordenadas Geográficas: latitude - 5°07'12.1" S e longitude - 39°10'33.3" W. A cobertura florestal da fazenda Normal foi muito explorada para atividade e pesquisa agropecuárias, mas existem áreas de reserva florestal com mínima intervenção humana. O clima do município de Quixeramobim é classificado como Tropical Quente Semiárido, com pluviosidade média anual de 707.7 mm, concentrada nos meses de fevereiro a abril, e temperatura média de 26 °C a 28 °C (IPECE, 2017c). A área apresenta altitude de 302 m acima do nível do mar, com topografia expressivamente aplainada típica de superfícies elaboradas por processos de pediplanação impostos pelas condições de semiaridez mais rigorosas. Os Luvisolos são a classe de solo predominante do local, e a vegetação está classificada como Caatinga arbustiva caducifólia espinhosa (IPECE, 2017c).

Figura 1. Mapa da localização das Fazendas Lagoa de Dentro, Normal, Não Me Deixes e Arizona, escolhidas para coletar os dados dendrométricos, estado do Ceará, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora

2.2 Coleta de dados e método de amostragem

Para este estudo foram escolhidas áreas onde é proibido por lei derrubar árvores, na área de Reserva Legal de duas fazendas e na área de RPPN de duas fazendas. Por isso a importância do uso do método semi-destrutivo, que faz uma estimativa do volume e peso das árvores fazendo medições com a árvore em pé, com limitadas podas de galhos pequenos

(PICARD et al., 2012).

Um total de 149 árvores foram selecionadas para desenvolver os modelos de regressão de biomassa acima do solo. Na Área 1 foram escolhidos, ao acaso, 31 árvores identificadas na Reserva Legal do Assentamento Lagoa de Dentro. Na Área 2 foram identificadas e selecionadas 67 árvores. Na Área 3 foram identificados e selecionados 20 indivíduos. Na Área 4 foram escolhidos 31 indivíduos localizados dentro da Reserva Legal da Fazenda Normal. As espécies a serem coletadas inicialmente foram escolhidas a partir do IVI – Índice de Valor de Importância do levantamento fitossociológico da RPPN Fazenda Não Me Deixes.

A coleta de dados de campo seguiu o Manual para Construção de Equações Alométricas de Volume e Biomassa de Árvores (PICARD et al., 2012). A medição da biomassa (kg) foi dividida em duas partes: medição da biomassa fresca aparada e não aparada. O método semi-destrutivo foi aplicado combinando medidas diretas para certas partes da árvore e medidas de volume para outras partes da árvore. Estes conceitos e procedimentos são descritos a continuação.

Visitas de campo foram realizadas nas quatro áreas antes de iniciar as medições das árvores, para verificar o estado de conservação da vegetação e para obter informações básicas sobre as árvores. Os critérios adotados durante a amostragem foram: evitar árvores ocas, com fuste retorcido, tortuoso e copas danificadas. A hipótese da independência dos resíduos foi atendida devido ao plano de amostragem randomizado que foi adotado. As árvores foram agrupadas em oito classes de diâmetro à altura do peito - classe 1: 3.0 a 7.9 cm; classe 2: 8.0 a 12.9 cm; classe 3: 13.0 a 17.9 cm; classe 4: 18.0 a 22.9 cm; classe 5: 23.0 a 27.9 cm; classe 6: 28.0 a 32.9 cm; classe 7: 33.0 a 37.9 cm e classe 8: 38.0 a 42.9 cm, e foram utilizadas para desenvolver os modelos de regressão da biomassa.

2.3. Medição das variáveis dendrométricas

A medição das variáveis dendrométricas seguiu o Manual para Construção de Equações Alométricas de Volume e Biomassa de Árvores (PICARD et al., 2012). O diâmetro à altura do peito (D, em cm, medido a 1.30 m do solo), a altura da árvore (H, em m), e o diâmetro basal (BD, em cm) foram obtidos diretamente no campo, sem cortar as árvores. As árvores da Caatinga possuem casca com espessura muito fina por isso o diâmetro foi medido com casca. O comprimento (C, em cm) e o diâmetro a cada 1 metro para os troncos e para todos os galhos grandes ($BD \geq 7$ cm) foram medidos para todas as árvores amostradas e finalmente utilizados

para o cálculo do volume. O BD (diâmetro na base) foi medido para todos os galhos menores ($BD < 7$ cm). É importante destacar que as árvores da Caatinga possuem diâmetros muito variáveis. Em nosso estudo, consideramos árvores com diâmetro a altura do peito (DBH) desde 3.00 cm a 41.00 cm.

Três ramos por planta foram aparados para medição. Em seguida as folhas, para aquelas plantas que estavam com folhas, foram separadas dos galhos aparados. A biomassa fresca das folhas dos galhos aparados e a biomassa fresca da madeira dos galhos aparados foram pesadas e determinadas separadamente. Cada ramo pesado teve o seu diâmetro na base (BD) medido. Uma alíquota de madeira de 15 cm de comprimento foi retirada de cada galho aparado, sendo três ao todo para cada árvore medida, e suas massas frescas (g) foram medidas no campo imediatamente após o corte. O material coletado foi acondicionado em sacos de papel e levado ao laboratório para análise posterior do peso seco e do teor de umidade.

2.4. Medição da biomassa seca aparada e não aparada

A biomassa seca de grandes galhos e troncos foi calculada a partir da medição do volume e densidade da madeira. A hipótese admitida foi que as seções dos troncos e galhos maiores foram consideradas um cilindro, enquanto a densidade da madeira foi considerada a mesma para todos os compartimentos da árvore. A biomassa seca de pequenos galhos não aparados foi calculada usando um modelo da relação entre a biomassa seca e o BD (diâmetro basal) de pequenos galhos aparados. Esse modelo foi estabelecido seguindo o mesmo procedimento utilizado para o desenvolvimento de um modelo alométrico, explicitado a seguir (PICARD et al., 2012).

2.5 Cálculo da biomassa

Todos os procedimentos de análise laboratorial relacionados as alíquotas de madeiras e aos cálculos da biomassa aparada e não aparada seguiram as orientações contidas em PICARD et al. (2012) e estão descritos a seguir.

2.5.1 Medição da biomassa fresca não aparada

A biomassa para pequenos ramos não aparados foi medida a partir da relação entre a biomassa seca e o diâmetro basal do ramo. A biomassa do tronco e dos grandes galhos foi estimada a partir de medidas de volumes (V_i em cm^3) e densidade média da madeira (em g cm^{-3}).

2.5.2 Cálculos

A biomassa seca da árvore foi obtida pela soma da biomassa seca aparada e da biomassa seca não aparada

$$(B_{seca_aparada} + B_{seca_n\tilde{a}o_aparada}) \quad \text{Equação (1)}$$

2.5.3. Cálculo da biomassa aparada

O conteúdo de umidade da madeira ($X_{madeira}$) foi calculado de $B_{Ms_da_Alíq}$ (biomassa da madeira seca da alíquota) e $Alíquota_BfMgA$ (alíquota da biomassa fresca da madeira do galho aparado), incluindo a casca da seguinte forma:

$$X_{wood} = B_{aliq_dry_wood} / B_{aliq_fresh_wood} \quad \text{Equação (2)}$$

No mesmo método, o teor de umidade das folhas (X_{folha}) foi calculado a partir da $B_{Fs_Alíquota}$ (biomassa da folha seca da alíquota) e $Alíquota_BfFgA$ (alíquota da biomassa fresca da folha do galho aparado), como segue:

$$X_{leaf} = B_{aliquot_dry_leaf} / B_{aliquot_fresh_leaf} \quad \text{Equação (3)}$$

A biomassa seca aparada ($B_{seca_aparada}$) foi então calculada como:

$$B_{trimmed_dry} = B_{aliq_fresh_wood} \times X_{wood} + B_{trimmed_fresh_leaf} \times X_{leaf} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde: B madeira fresca aparada é a biomassa fresca da madeira no ramo aparado e B folha fresca aparada é a biomassa fresca das folhas retiradas do ramo aparado.

2.5.4 Cálculo da biomassa não aparada

O tronco, ramos principais, pequenos ramos não aparados e folhas são os principais componentes da biomassa seca não aparada. A média da biomassa fresca das folhas dos galhos aparados foi multiplicada pelo total de pequenos ramos não aparados e pelo teor de umidade das folhas para se obter a biomassa seca das folhas dos galhos não aparados (B_{seca_folhas}). A biomassa não aparada ($B_{seca_N\tilde{a}o_aparada}$) foi considerada a soma dos dois resultados:

$$B_{seca_n\tilde{a}o_aparada} = B_{ramos_secos_n\tilde{a}o_aparados} + B_{seca_tronco} + B_{seca_folhas} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde: Bramos secos não aparados: Biomassa dos ramos secos não aparados; B_{seca_tronco} : Biomassa seca do tronco.

Durante a análise do volume das seções secas, cada i seção do tronco e do ramo grande foi considerada um cilindro (fórmula de Smalian).

$$V_i = (\pi / 8) L_i(D_{1i}^2 + D_{2i}^2) \quad \text{Equação (6)}$$

Onde V_i é o volume da seção i , L_i o seu comprimento, e D_{1i} e D_{2i} são os diâmetros das duas extremidades da secção de i .

A biomassa seca do tronco e dos galhos grandes foi calculada da mesma maneira (produto da densidade média da madeira e do volume total do galho e tronco grandes).

$$B_{dry_section} = \rho \times \sum i V_i \quad \text{Equação (7)}$$

A soma corresponde a todas as seções dos galhos grandes e dos troncos e onde a densidade média da madeira foi calculada como:

$$\rho = B_{aliquot_dry_wood} / V_{aliquot_fresh_wood} \quad \text{Equação (8)}$$

A biomassa seca de pequenos galhos não aparados foi calculada usando um modelo entre a biomassa seca e o BD (diâmetro basal) de pequenos galhos aparados. Esse modelo foi estabelecido seguindo o mesmo procedimento utilizado para o desenvolvimento de um modelo alométrico (PICARD et al., 2012).

Foi utilizada a equação do tipo linear:

$$B_{dry_branch} = a + bD \quad \text{Equação (9)}$$

Onde a e b são os parâmetros do modelo e D é o diâmetro basal do galho (BD).

Usando este modelo, a biomassa seca de galhos não aparados foi calculada como:

$$B_{untrimmed_dry_branch} = \sum_j (a + bD_j) \quad \text{Equação (10)}$$

onde, $B_{galho_seco_não_aparado}$ é a soma de todos os pequenos galhos não aparados e o D é o diâmetro basal (BD) do ramo j .

2.6. Análise dos dados e seleção dos modelos

Após a conclusão das medições em campo e em laboratório, os dados foram resumidos em planilhas do Excel. Utilizou-se as variáveis independentes D (em cm), H (em m) e ρ (em $g\ cm^{-3}$) e diversas combinações (ver Tabela 3) para selecionar as melhores variáveis combinadas com alta correlação com AGB (em kg). O software Statistical Package R (versão R 4.4.2) foi utilizado para formular as equações alométricas.

A seleção dos modelos de regressão da biomassa foi testada com bases em estatísticas de ajuste do modelo, incluindo coeficiente de determinação (R^2 ajustado), erro padrão residual (RSE), critério de informação de Akaike (AIC) e p -valor. AIC é um estimador da qualidade relativa de modelos estatísticos para um determinado conjunto de dados. O AIC estimou a qualidade de cada modelo em relação um ao outro.

Desenvolvemos equações alométricas de multi-espécies de árvores para estimar a biomassa acima do solo da área em estudo. Assim procedemos porque não existe uma equação universal para estimar a biomassa da Caatinga (PEREIRA JUNIOR et al., 2016), e optamos por não utilizar as equações pantropicais existentes. A aplicação de modelos locais reduz as incertezas e melhora a precisão da estimativa da biomassa (KEBEDE; SOROMESSA, 2018).

2.7 Comparação com modelos da literatura

Comparamos o melhor modelo obtido com o modelo proposto por Sampaio e Silva (2005), com o modelo pantropical para espécies mistas de Brown et al. (1989), Chave et al. (2005), e com o modelo de Zianis (2008). Um teste t pareado também foi realizado para comparar as previsões do melhor modelo com cada modelo pantropical. Antes, os dados foram submetidos aos testes de Kolmogorov-Smirnov e Shapiro-Wilk, e foram ambos significativamente não-normais. Para atender os pressupostos do teste, as estimativas das médias foram transformadas em Log. Nesta comparação, a hipótese nula a ser testada é que a diferença média entre as estimativas do modelo local e de cada modelo pantropical é zero a um nível de confiança de 95%, com a alternativa de que a diferença média não é zero conforme indicado abaixo:

$$H_0: \mu_d = 0$$

$$H_a: \mu_d \neq 0$$

Calculou-se o tamanho do efeito com equação proposta por Rosnow e Rosenthal (2005):

$$r = \sqrt{\frac{t^2}{t^2 + gl}} \quad \text{Equação (11)}$$

Nesta equação, r é o tamanho do efeito, t é estatística t de Student e gl os graus de liberdade (número de grupos – 1). O tamanho de efeito da comparação foi interpretado seguindo o seguinte critério: $r < 0.19$, efeito insignificante; $0.2 \leq r < 0.5$, efeito pequeno; $0.5 \leq r < 0.8$, efeito médio; $0.8 \leq r < 1.29$, efeito grande; $r > 1.30$, efeito muito grande (ROSENTHAL; ROSNOW, 2009).

2.8 Estoque de carbono

Seguindo a recomendação do IPCC (2006) para florestas tropicais e subtropicais, a estimativa do Carbono fixado na biomassa arbórea foi obtida por meio da multiplicação da biomassa quantificada pelo fator 0.47 (equação 12).

$$EC = 0,47 \times AGB \quad \text{Equação (12)}$$

Em que:

EC = estoque de carbono, em t-C ha⁻¹, AGB = biomassa acima do solo, em t ha⁻¹, estimada a partir da seleção do melhor modelo local. 0,47 = fator de conversão de biomassa para carbono (IPCC, 2006).

3 RESULTADOS

Como as árvores foram avaliadas no início do mês de fevereiro de 2021, ainda sem a ocorrência da estação das chuvas, as espécies encontradas com folhas foram somente *Commiphora leptophloeos*, *Amburana cearensis*, *Aspidosperma pyriforme* e *Dalbergia cearensis*. A descrição das espécies se encontra resumida na Tabela 1.

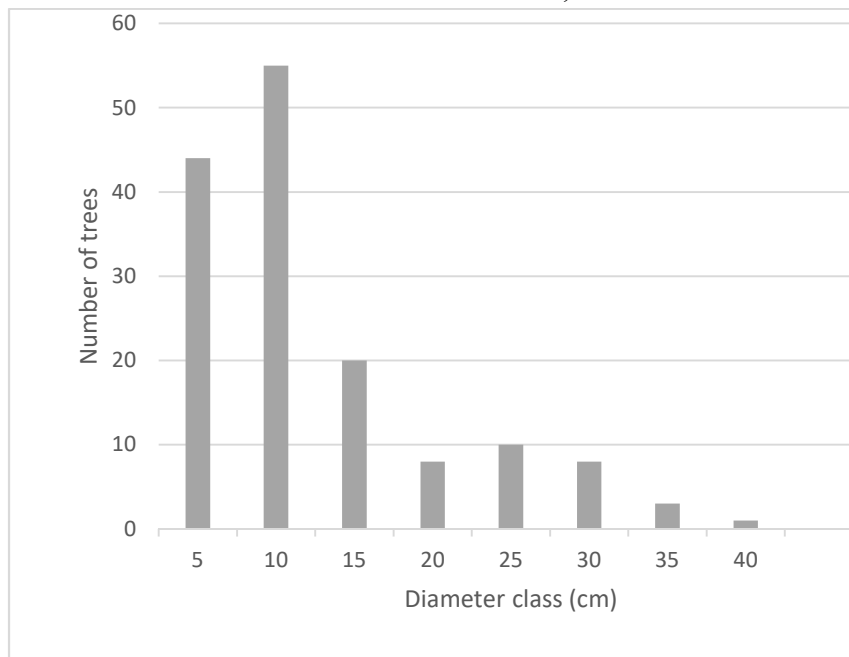
Tabela 1 - Espécie, família, nome comum, número de indivíduos avaliados e densidade da madeira da Floresta Tropical Sazonalmente Seca, Ceará, Brasil.

Espécie	Família	Nome comum	*N	*ρ
<i>Agonandra brasiliensis</i> Miers ex Benth. & Hook.f.	Opiliaceae	Pau-marfim	4	0.64
<i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm.	Fabaceae	Cumaru	4	0.55
<i>Aspidosperma pyriforme</i> Mart. & Zucc.	Apocynaceae	Pereiro	12	0.64
<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong.) Steud.	Fabaceae	Mororó	4	0.73
<i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P.Lewis	Fabaceae	Catingueira	4	0.76
<i>Cochlospermum vitifolium</i> (Willd.) Spreng.	Bixaceae	Pacotê	4	0.39
<i>Combretum leprosum</i> Mart.	Combretaceae	Mofumbo	7	0.65
<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J.B.Gillett	Bursaceae	Imburana-de-Espinho	4	0.38
<i>Cordia glazioviana</i> (Taub.) Gottschling & J.S.Mill.	Boraginaceae	Pau-branco-louro	8	0.69
<i>Cordia oncocalyx</i> Allemão	Boraginaceae	Pau-branco-preto	4	0.61
<i>Cordia trichotoma</i> (Vell.) Arráb. ex Steud.	Boraginaceae	Frei-Jorge	4	0.62
<i>Croton jacobinensis</i> Baill.	Euphorbiaceae	Marmeleiro-preto	13	0.67
<i>Dalbergia cearensis</i> Ducke	Fabaceae	Pau-Violeta	30	0.90
<i>Guapira nitida</i> (Mart. ex J.A.Schmidt) Lundell	Nyctaginaceae	João-mole	4	0.60
<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl) Baill.	Euphorbiaceae	Pinhão-Bravo	5	0.42
<i>Libidibia ferrea</i> (Mart. xx Tul.) L.P.Queiroz	Fabaceae	Jucá	6	0.84
<i>Manihot carthagenensis</i> (Jacq.) Müll. Arg.	Euphorbiaceae	Maniçoba	6	0.49
<i>Mimosa arenosa</i> (Willd.) Poir.	Fabaceae	Unha-de-gato	3	0.66
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.	Fabaceae	Sabiá	4	0.76
<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	Fabaceae	Jurema-preta	5	0.80
<i>Piptadenia stipulacea</i> (Benth.) Ducke	Fabaceae	Jurema-branca	4	0.75
<i>Ptyrocarpa moniliformis</i> (Benth.) Luckow & R.W. Jobson	Fabaceae	Catanduva	6	0.68
<i>Ptyrocarpa viridiflora</i> (Kunth.) Brenan	Fabaceae	Surucucu	4	0.77

* ρ = Densidade da madeira; N = número de indivíduos avaliados

As três primeiras classes de diâmetro (3.0 a 17.9 cm) agruparam 119 indivíduos. Isto representa 79.86% do total de 149 indivíduos avaliados. As cinco restantes foram representadas por indivíduos com diâmetros acima de 18 cm até alcançar a última classe representada por um indivíduo de 41 cm de diâmetro. Os dados das árvores agrupadas em classes de diâmetro foram utilizados para avaliar o crescimento da floresta e a biomassa acima do solo. A distribuição diamétrica da Floresta Tropical Sazonal Seca brasileira (Caatinga), por concentrar o maior número de indivíduos nas três primeiras classes de diâmetro e possuir árvores de diferentes estágios de desenvolvimento e idades, demonstrou ter formato de J reverso (Gráfico 1).

Gráfico 1. Distribuição diamétrica de 149 indivíduos adultos na Floresta Tropical Sazonal Seca localizada no estado do Ceará, Brasil.



Fonte: Elaborado pela autora

Foram desenvolvidas modelos multiespécies com base no conjunto de dados extraídos de 149 indivíduos. As equações alométricas foram desenvolvidas a partir da relação da AGB com as variáveis D, H e densidade da madeira (ρ), individualmente e em combinação. Os dados das variáveis principais (D e H) foram gerados a partir de medições diretas de campo, enquanto os dados de AGB e ρ foram calculados a partir de amostras de campo e medições em laboratório. Um resumo descritivo das principais variáveis está apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo estatístico das principais variáveis dendrométricas das 149 árvores

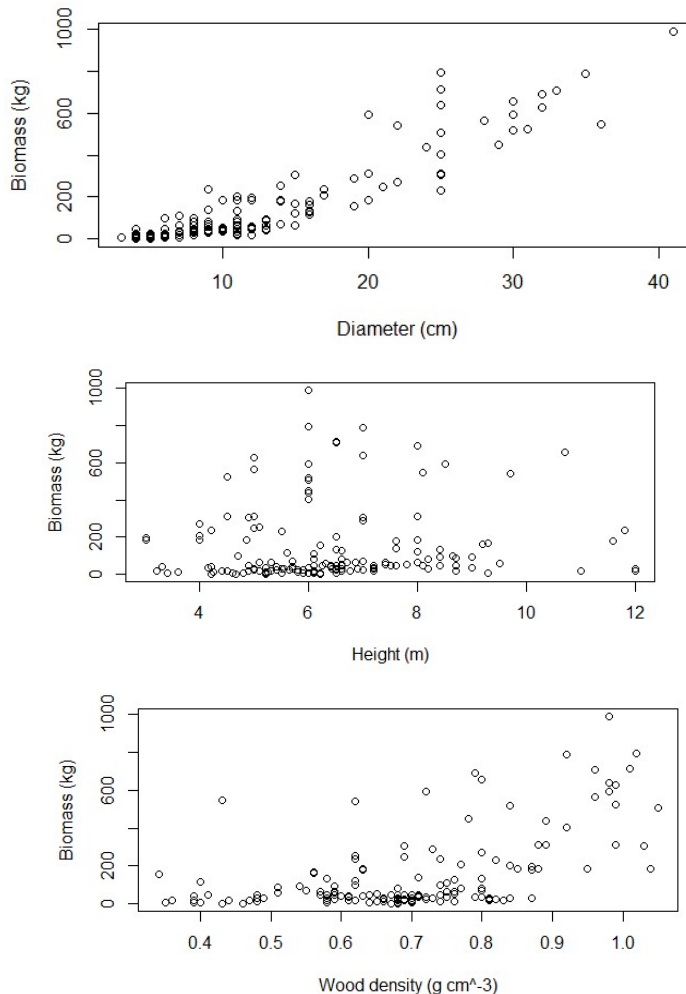
Variáveis*	Min.	Max.	Média	SD
AGB	1.50	987.19	120.69	204.98
D	3.00	41.00	12.46	8.18
H	3.00	12.00	6.41	1.80
P	0.34	1.05	0.69	0.15

Fonte: Elaboração própria

*AGB= Biomassa acima do solo (kg), D = diâmetro a nível do peito (cm), H = altura (m), ρ = densidade da madeira (g cm^{-3}), SD = desvio padrão.

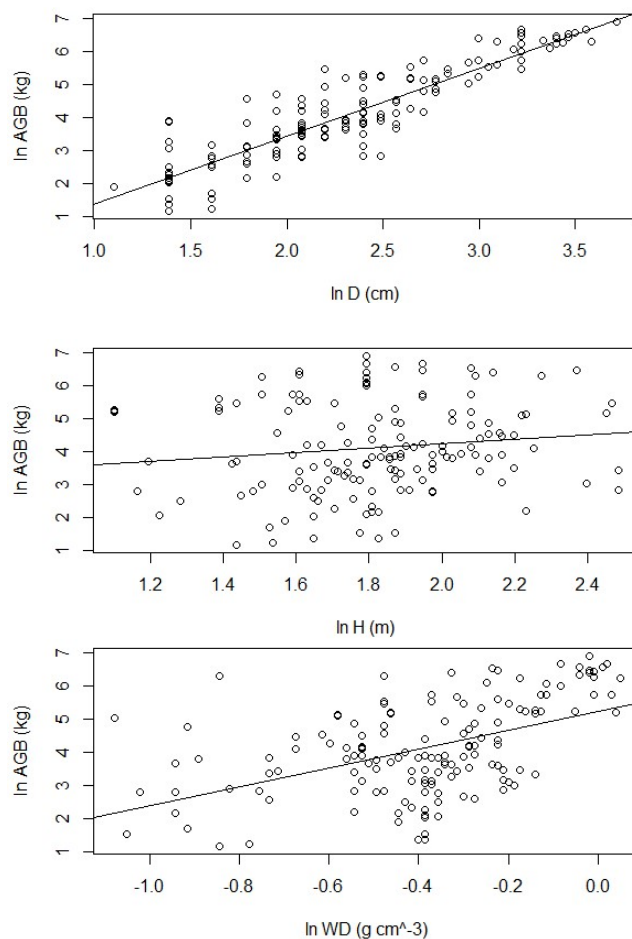
Os gráficos de dispersão de AGB versus variáveis explicativas indicaram relações não lineares e a variância da biomassa aumenta quando aumenta o diâmetro, altura e densidade da madeira (Gráfico 2). Conseqüentemente, devido à heterocedasticidade das variâncias, a função de potência foi logaritmicamente transformada na forma linear $\ln Y = \ln a + b * \ln (D)$.

Gráfico 2. Nuvem de pontos da biomassa seca em função do diâmetro (cm), altura (m) e densidade da madeira (g cm^{-3}) de 149 indivíduos adultos na Floresta Tropical Sazonal Seca localizada no estado do Ceará, Brasil.



Ao trabalhar com dados transformados em logaritmo se estabiliza a variância residual. O gráfico 3 mostra que relação entre o logaritmo da biomassa $\ln(B)$ e o logaritmo do diâmetro $\ln(D)$, do logaritmo da altura $\ln(H)$ e do logaritmo da densidade da madeira corresponde a uma relação linear para os 149 indivíduos de espécies mistas.

Gráfico 3. Nuvem de pontos (dados transformados logaritmicamente) de biomassa seca total (kg) em função do diâmetro na altura do peito (D, cm), altura da árvore (H, m) e densidade da madeira (WD) (ρ , g cm⁻³) para os 149 indivíduos das espécies mistas.



Os dados de AGB e as variáveis independentes D, H e ρ , transformados logaritmicamente, foram submetidos à regressão linear. Uma a uma dessas variáveis, e suas combinações, foram usadas para ajustar as equações alométricas. No total, dez equações alométricas foram desenvolvidas para as multiespécies e avaliadas por estatísticas de qualidade do ajuste.

O modelo 1 representa a melhor equação alométrica com base nas estatísticas de qualidade do ajuste (R^2 -adj, RSE, AIC, e $p < 0.000$). O valor de R^2 -adj igual a 84,50% para esse modelo nos informa quanta variância de AGB pode ser creditada ao modelo se ele tiver

vido derivado da população de onde a amostra foi retirada. O modelo 2 alcançou as estatísticas de qualidade de ajuste bem próxima do primeiro modelo. Os modelos 3 a 10 alcançaram as estatísticas de qualidade do ajuste (AIC, RSE e R²-adj) inferiores aos dois primeiros modelos. O modelo 10 que relaciona H como única variável preditora da AGB, apresentou o valor mais baixo em comparação a todos os outros modelos, e foi o único estatisticamente não significativo ($p = 0.109$). Todos os modelos estudados estão listados na Tabela 3, em ordem decrescente de importância com base no valor de AIC. A Tabela 3 também apresenta os modelos ajustados com os dados não transformados de cada equação alométrica.

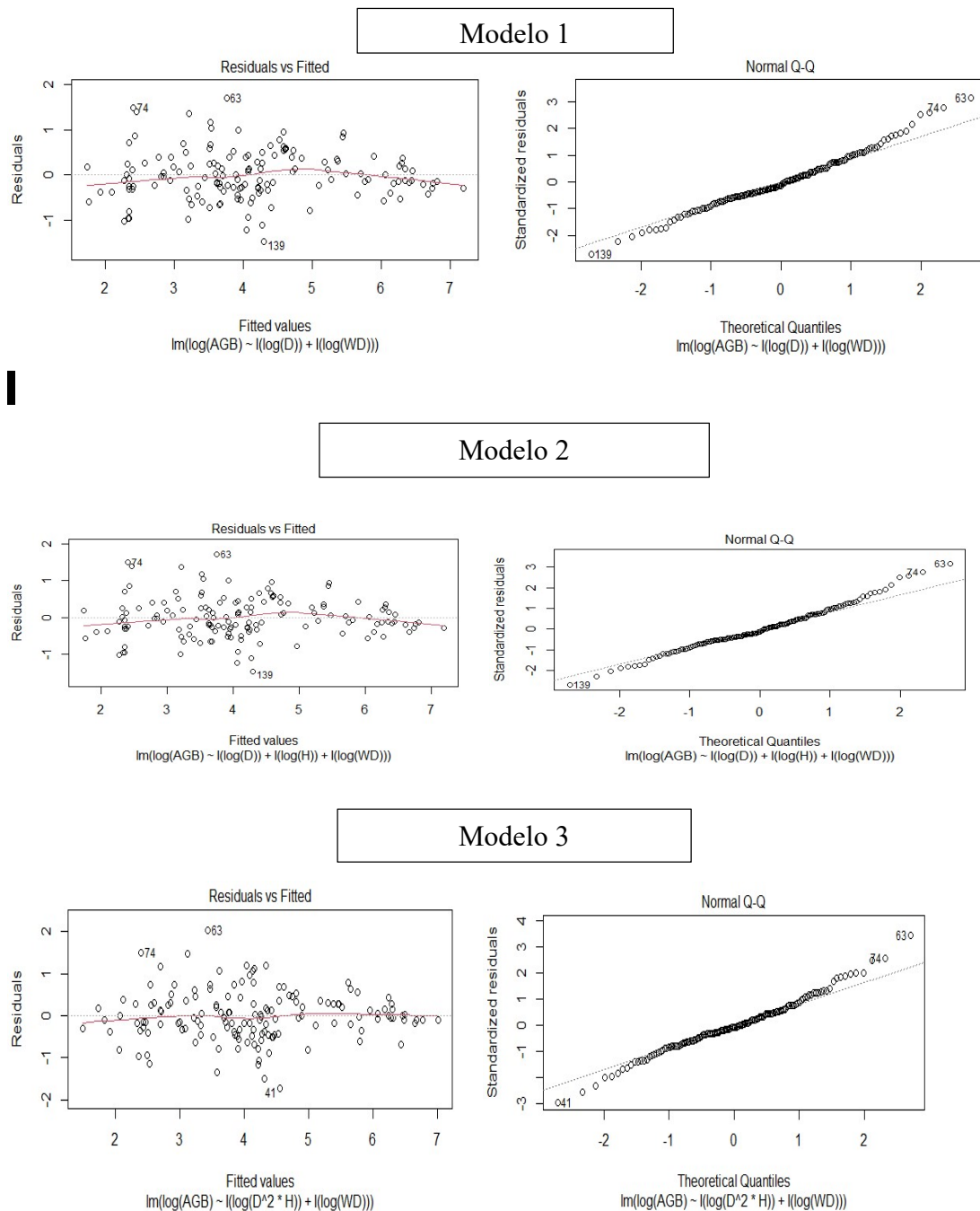
Tabela 3 - Modelos ajustados para prever AGB de espécies mistas na FTSS Brasileira, Ceará, Brasil.

N	Modelo	Equações alométricas	Coeficientes		Performance estatística do modelo			
			Símbolo	Valor	R ² adj	RSE	AIC	p-valor
149	1	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(\rho)$ Modelo ajustado: $AGB = 1.274 * (D)^{1.876} * (\rho)^{1.273}$	α	0.242	0.845	0.547	248.073	< 0.000
			β_1	1.876				
			β_2	1.273				
149	2	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(H) + \beta_3 \ln(\rho)$ Modelo ajustado: $AGB = 1.246 * (D)^{1.874} * (H)^{-0.015} * (\rho)^{1.277}$	α	0.220	0.844	0.549	250.065	< 0.000
			β_1	1.874				
			β_2	0.015				
			β_3	1.277				
149	3	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D^2 * H) + \beta_2 \ln(\rho)$ Modelo ajustado: $AGB = 0.474 * (D^2 * H)^{0.844} * (\rho)^{1.555}$	α	-0.746	0.818	0.593	272.253	< 0.000
			β_1	0.844				
			β_2	1.555				
149	4	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D^2 * H * \rho)$ Modelo ajustado: $AGB = 0.256 * (D^2 * H * \rho)^{0.899}$	α	-1.359	0.807	0.611	280.201	< 0.000
			β_1	0.899				
149	5	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D)$ Modelo ajustado: $AGB = 0.521 * (D)^{2.047}$	α	-0.651	0.802	0.618	283.718	< 0.000
			β_1	2.047				
149	6	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(H)$ Modelo ajustado: $AGB = 0.726 * (D)^{2.065} * (H)^{-0.205}$	α	-0.319	0.802	0.618	284.469	< 0.000
			β_1	2.065				
			β_2	-0.205				
149	7	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D^2 * H * \rho)$ Modelo ajustado: $AGB = 0.224 * (D^2 * H * \rho)^{1.494}$	α	-1.498	0.754	0.689	316.165	< 0.000
			β_1	1.494				
149	8	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D^2 * H)$ Modelo ajustado: $AGB = 0.150 * (D^2 * H)^{0.927}$	α	-1.893	0.751	0.693	317.946	< 0.000
			β_1	0.927				
149	9	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(D * H)$ Modelo ajustado: $AGB = 0.088 * (D * H)^{1.576}$	α	-2.422	0.658	0.813	365.355	< 0.000
			β_1	1.576				
149	10	$\ln(AGB) = \alpha + \beta_1 \ln(H)$ Modelo ajustado: $AGB = 18.821 * (H)^{0.654}$	α	2.935	0.010	1.384	523.764	p=0.109
			β_1	0.654				

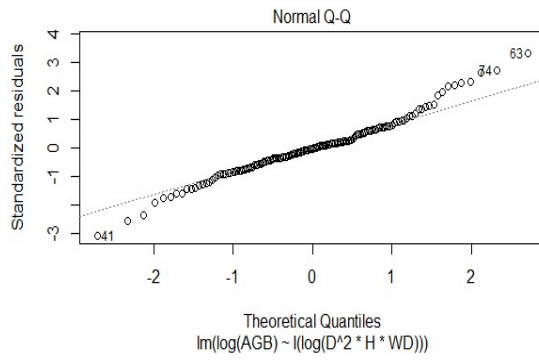
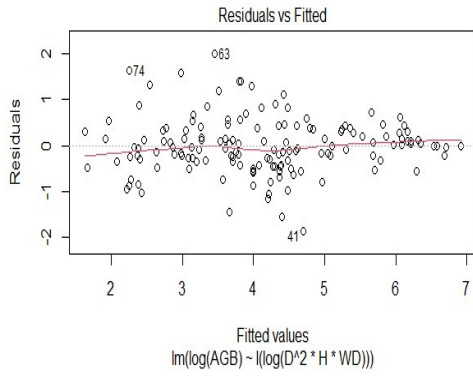
Fonte- elaboração própria

Construiu-se todos os gráficos dos 10 modelos dos quantis e resíduos da regressão da AGB em relação as variáveis preditivas (gráfico 4).

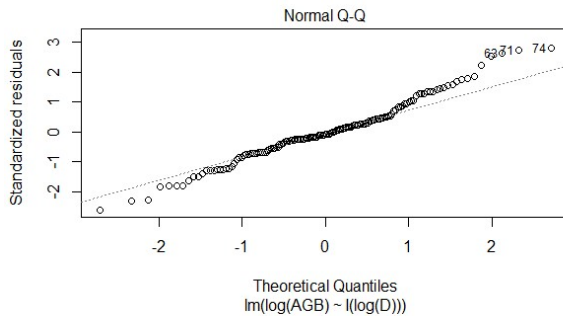
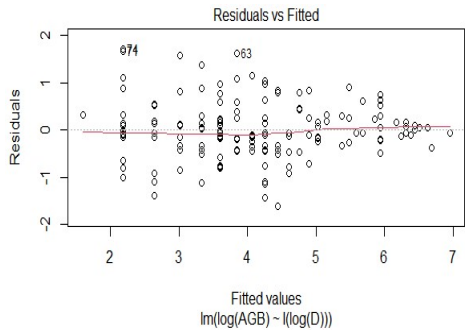
Gráfico 4. Gráficos dos resíduos em função dos valores previstos (à esquerda) e gráfico quantil-quantil (à direita) dos resíduos da regressão linear simples de \ln (AGB) com relação a \ln (D) referentes a todos os modelos.



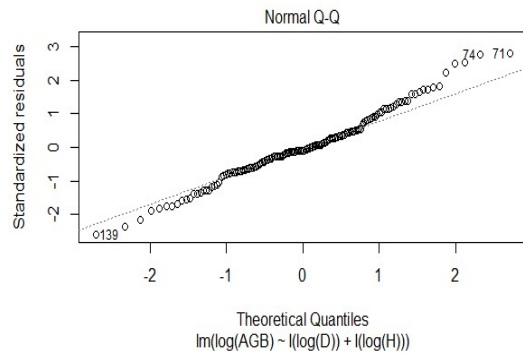
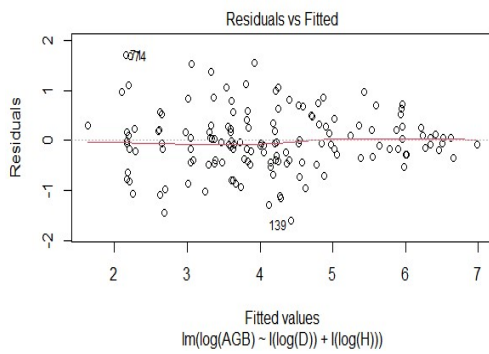
Modelo 4



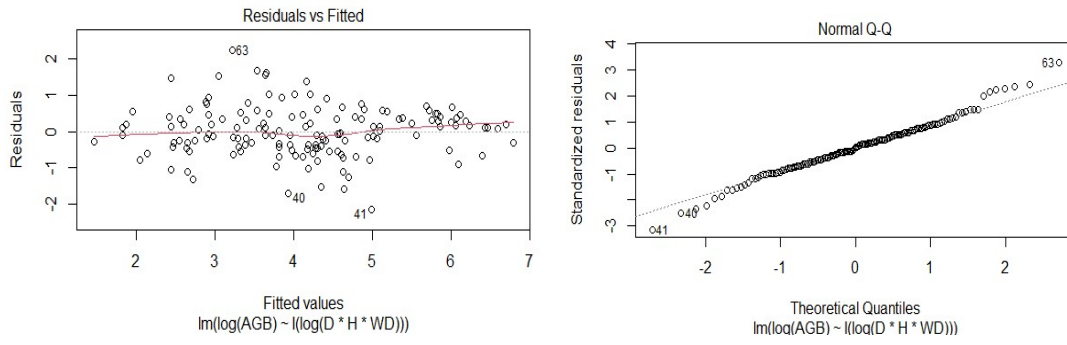
Modelo 5



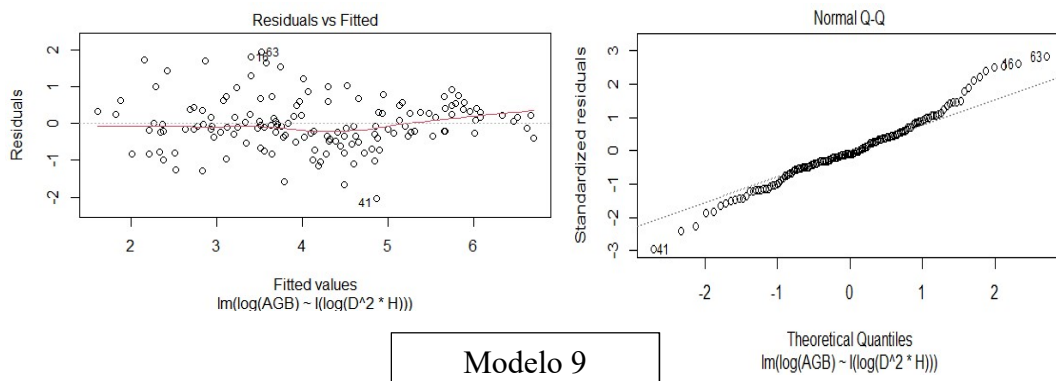
Modelo 6



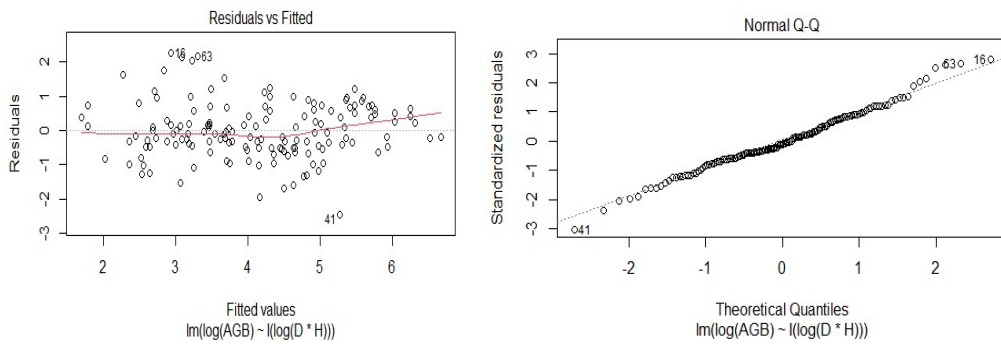
Modelo 7



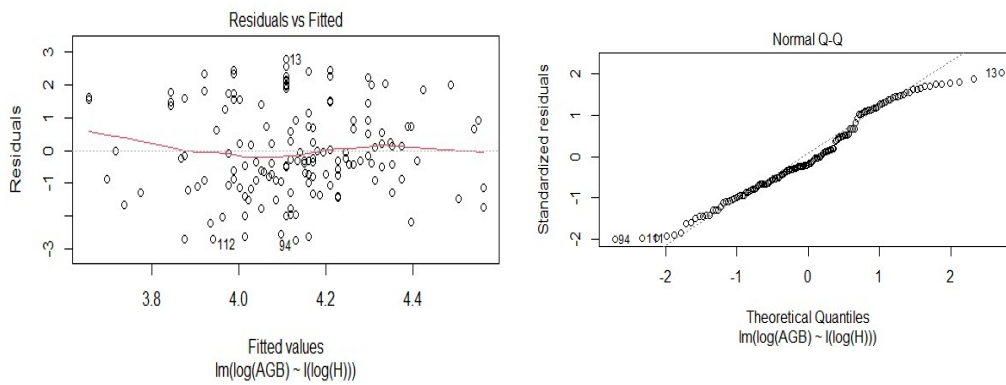
Modelo 8



Modelo 9



Modelo 10



3.1 Comparação do modelo local com modelos alométricos da literatura

O desempenho de nosso melhor modelo local (modelo 1) foi comparado com os modelos de uma equação da Caatinga e com modelos pantropicais. O teste *t* pareado entre o nosso melhor modelo local e o modelo de Sampaio e Silva (2005) e os modelos pantropicais de Zianis (2008), Brown et al. (1989) e Chave et al. (2005) revelam, respectivamente, que há evidências que refutam a hipótese nula ($t = 19.5, p < 0.000$; $t = 19.1, p < 0.000$; $t = 30.7, p < 0.000$ e $t = 31.6, p < 0.000$). Os tamanhos de efeito averiguados exibiram valores de pequeno efeito ($r = 0.40$) e grande efeito ($r = 1.29, r = 1.08, r = 1.08$), respectivamente. Assim, é possível presumir que o melhor modelo local não é equivalente quanto a estimativa de AGB das espécies lenhosas da Caatinga quando comparados com os modelos pantropicais e a equação desenvolvida pelo Sampaio e Silva (2005). A Tabela 4 apresenta os resultados das análises estatísticas realizadas com as médias pareadas do modelo local (modelo 1) com os modelos disponíveis na literatura.

Tabela 4 - Paired Samples Test e tamanho do efeito do modelo local (modelo 1) em relação aos modelos disponíveis na literatura (n = 149).

Modelos	Paired Differences					<i>t</i>	df (gl)	Sig.	r	Referência
	Mean	SD	SEM	95% CI						
$AGB = 0.173(D)^{2.295}$	0.227	0.142	0.011	0.204	0.250	19.5	148	<0.000	0.40	Sampaio e Silva (2005)
$AGB = 0.1424(D)^{2.3679}$	0.238	0.152	0.012	0.214	0.263	19.1	148	<0.000	1.29	Zianis (2008)
$AGB = 0,0899(D^2Hp)^{0.952}$	0.315	0.125	0.010	0.295	0.336	30.7	148	<0.000	1.08	Brown et al. (1989)
$AGB = 0.112 (D^2Hp)^{0.916}$	0.316	0.121	0.009	0.296	0.335	31.6	148	<0.000	1.08	Chave et al. (2005)

Mean = diferença da média entre os escores; SD = Std. Deviation; SEM = Std. Error Mean; 95% CI = 95% confidence interval of the differences; *t* = Student; gl=grau de liberdade; sig.= significância, r = tamanho do efeito.

3.2 Estoque de carbono

Utilizou-se a equação $AGB = 1.274 * (D)^{1.876} * (\rho)^{1.273}$ para obter das 149 árvores avaliadas neste estudo a quantidade de 21.6 t de biomassa acima do solo, enquanto a estimativa para o Carbono fixado na biomassa arbórea é de 10.15 t.

4 DISCUSSÃO

4.1 Avaliação das espécies florestais e desenvolvimento dos modelos alométricos

Das 22 espécies arbóreas avaliadas apenas *C. leptophloeos*, *A. cearensis*, *A. pyrifolium* e *D. cearensis* estavam com folhas. Na Caatinga não há um padrão para a fenologia das árvores. Existem espécies lenhosas que a abscisão foliar ocorre no final da estação chuvosa, enquanto outras árvores mantêm suas folhas durante a estação seca, desta forma as diferentes espécies arbóreas exibem padrões fenológicos diferenciados no tempo e espaço (GRIZ; MACHADO, 2001; BORCHERT et al., 2002). Além disso, na Caatinga a fenologia das espécies arbóreas é determinada principalmente pela disponibilidade de água, que pode variar em função da densidade da madeira (LIMA; RODAL, 2010; LIMA et al., 2012).

A distribuição da classe diamétrica das árvores em forma de J-reverso indica que o processo de crescimento da floresta está em equilíbrio estável (PADMAKUMAR et al., 2018). Isto caracteriza uma comunidade florestal autoregenerante, com o maior número de indivíduos concentrados nas menores classes de diâmetros. Comumente, uma distribuição de classe de diâmetro em forma de J- reverso é observada em povoamentos maduros e pode indicar a estabilidade da população e o bom recrutamento de espécies sucessionais tardias (GONÇALVES et al., 2017). Os grandes condutores de produção de biomassa das FTSS são insolação e precipitação (WAGNER et al., 2014). A disponibilidade hídrica varia muito no semiárido. Assim, uma estiagem prolongada em anos consecutivos mostra o impacto das condições climáticas na produção de biomassa na floresta sazonalmente seca (CAMPOS et al., 2020; SPANNL, 2016).

As variáveis altura (H), diâmetro à altura do peito (D) e densidade da madeira (ρ) mostram uma expressiva heterogeneidade quanto ao crescimento das árvores (Tabela 2). De fato, esse comportamento já foi observado para as florestas tropicais secas em consequência das condições climáticas adversas e heterogeneidade ambiental (FEELEY et al., 2007; PADMAKUMAR et al., 2018). Para Lavorel e Garnier (2002), ecossistema no sentido conceitual é o resultado final de vários filtros ambientais que atuam em diferentes escalas sobre os indivíduos, e depois os reúne em comunidades com características variadas. Assim, o ambiente exerce influência nos processos ecológicos e seus efeitos são naturalmente observados na produtividade vegetal, no crescimento e distribuição das espécies (LAVOREL; GARNIER, 2002).

Por outro lado, o caráter funcional das espécies florestais está seguindo nova

tendência em decorrência das mudanças climáticas globais. Feeley et al. (2007) observaram mudanças no crescimento das árvores associadas a significativas mudanças climáticas na ilha de Barro Colorado, Panamá, e em Pasoh, Malásia. A taxa de crescimento do caule das árvores diminuiu independentemente do tamanho do indivíduo, da espécie e da comunidade. Os citados autores especulam que se o crescimento desacelerado do caule resultar em taxas mais lentas de absorção de Carbono, isso poderia estimular o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera. E, conseqüentemente, produziria temperaturas mais altas e menor produtividade líquida das florestas. Outro potencial feedback que Feeley et al. (2007) cogitaram foi a possibilidade de uma produção reduzida de madeira forçar os madeireiros a compensarem essa perda com um aumento de área colhida, resultando em maiores emissões de CO₂ por meio de desmatamento e incêndios associados, bem como aumento nas taxas de fragmentação/degradação ambiental e extinção de espécies.

O modelo 1 que utiliza as variáveis preditoras múltiplas D (diâmetro à altura do peito) e ρ (densidade da madeira) é o mais efetivo para avaliar a biomassa de espécies mistas na Floresta Tropical Sazonal Seca localizada no estado do Ceará, Brasil. Esse modelo é menos complexo do que o segundo porque não utiliza a altura da árvore como variável explicativa.

Em uma análise mais geral, a equação proposta pelo modelo 1 se baseia na relação entre volume e peso, assim o diâmetro e a altura nos dão uma ideia do volume da árvore, enquanto volume e densidade da madeira nos dão uma ideia do peso seco. É notória a existência de diferença de densidade da madeira entre as vinte e duas espécies (0.34 a 1.05 g cm⁻³), ou seja, a maior densidade é três vezes a menor. A variável densidade da madeira é importante para a modelagem da biomassa acima do solo, mesmo que seu valor varie para diferentes partes da árvore (PICARD et al., 2012). Essa variável preditora é um dado necessário para a conversão de volume florestal em dados de biomassa seca (PICARD et al., 2012; KEBEDE; SOROMESSA, 2018). Sua utilização na modelagem da biomassa pode auxiliar na explicação da variação do local e nas variações de características funcionais das espécies arbóreas (LIMA et al., 2012).

Em geral, existe variabilidade da densidade da madeira entre espécies, entre indivíduos da mesma espécie, e no mesmo indivíduo (ABOAL et al., 2005; LIMA et al., 2012; PICARD et al., 2012). Uma das desvantagens do método semi-destrutivo é que é impossível verificar as diferenças de densidade entre um compartimento da árvore e outro. O nosso estudo considerou a hipótese de mesma densidade da madeira para todos os compartimentos da árvore. De fato, é muito caro e desafiador colher amostras de densidade da madeira em condições de campo e depois realizar suas análises em laboratório. Uma estratégia é obter essa variável em

algum banco de dados (HENRY et al., 2013).

O modelo de regressão que utiliza as variáveis preditivas múltiplas $D + H + \rho$ (modelo 2) é o segundo melhor para avaliar a biomassa de espécies mistas na Caatinga. A análise de regressão indica que a densidade da madeira é uma variável efetiva na melhoria da estimativa da biomassa. Nós desenvolvemos o modelo com a inclusão da densidade da madeira como variável somada ao diâmetro e a altura. Nesse modelo, a inclusão da densidade da madeira melhora a performance das estatísticas de ajuste, quando comparada aos demais modelos.

Outros estudos reforçam a robustez de modelos alométricos que incluem $D + H + \rho$ na estimativa da biomassa acima do solo para espécies mistas em ecossistemas africanos (FAYOLLE et al., 2013; DJOMO et al., 2016), em florestas tropicais secas (NÁVAR, 2009) e para espécie da Caatinga (NOGUEIRA et al., 2021). A densidade da madeira melhorou a estimativa da biomassa acima do solo em povoamentos de *Fagus orientalis* e *Carpinus betulus* (VAHEDI et al., 2014). Esses autores, introduziram a densidade da madeira em modelos lineares desenvolvidos somente com diâmetro e altura, e observaram o aumento de R^2_{adj} , redução dos desvios médios e diminuição do valor de AIC.

A inclusão da densidade da madeira, em adição a D e H , melhorou as estatísticas de qualidade do ajuste em modelos alométricos na avaliação da biomassa da floresta tropical (BASUKI et al., 2009; CHAVE et al., 2014). Fatores ambientais não interferiram em um modelo construído com as variáveis diâmetro, altura e densidade da madeira para avaliar a biomassa de vários tipos de vegetação tropical. O enviesamento percentual médio e a variância desse modelo foram apenas ligeiramente mais elevados do que os modelos ajustados localmente (CHAVE et al., 2014). Adicionar densidade de madeira em modelos para estimar a biomassa de espécies mistas composta de grandes árvores, é importante, uma vez que estimativas de biomassa para árvores com grandes diâmetros são mais variáveis, além disso, essas árvores têm uma contribuição desproporcionalmente grande para a biomassa florestal (BASUKI et al., 2009).

A inclusão de H como uma variável preditora adicional nas equações de biomassa melhora significativamente o ajuste do modelo e a sua capacidade preditiva (MOLTO et al., 2014; PICARD et al., 2015; MENSAH et al., 2017). De fato, a biomassa das árvores é afetada por sua altura e densidade da madeira (BASUKI et al., 2009). Nas áreas onde realizamos este estudo, as árvores dificilmente atingem alturas superiores a vinte metros e, diferente do que ocorre na floresta tropical úmida, a copa das árvores não forma dossel. Na Caatinga as plantas experimentam um longo período de seca por ano e a maioria das plantas perde suas folhas durante esse período como estratégia para enfrentar a perda de água (LIMA et al., 2012). Essa

característica fisionômica da Caatinga permite medir a altura das árvores mais facilmente. Mesmo que seja fácil medir a altura das árvores derrubadas, este não é o nosso caso, pois utilizamos o método semi-destrutivo onde a altura da árvore é medida com ela em pé no campo.

A variável D é comumente utilizada para estimar a biomassa de árvores (VAHEDI et al., 2014; XIANG et al., 2016). Em nosso estudo, o modelo em que utilizamos D como variável preditora única não melhorou a estimativa da biomassa. No entanto, o diâmetro como variável preditora única é melhor do que modelos que incluem, por exemplo, altura e área da coroa, quando se leva em conta o custo e a praticabilidade da medição (KUYAH et al., 2016; KEBEDE; SOROMESSA, 2018). Além disso, estimar a AGB através de D como única variável explicativa amplia a aplicação das equações alométricas para escalas maiores como, por exemplo, a aplicação em inventários florestais. Esses inventários, na grande maioria, incluem somente a medição do diâmetro à altura do peito que é uma variável fácil de medir em campo e com boa precisão (SEGURA; KANNINEN, 2005; KEBEDE; SOROMESSA, 2018; FEYISA et al., 2018, DONG et al., 2018).

Por outro lado, utilizar somente D em um modelo alométrico não garante estimativas precisas da biomassa total ou dos componentes das árvores. Equações alométricas que utilizam D como única variável preditiva superestimam ou subestimam a biomassa florestal (MARSHALL et al., 2012; ALVAREZ et al., 2012), porque para um dado D ocorre grande variação entre os componentes das árvores e da biomassa total (DONG et al., 2018). Essa variação irá depender do tamanho da árvore amostrada na parcela. Por exemplo, valores para o peso são subestimados em árvores com diâmetros menores e superestimados em árvores com diâmetros maiores (ABOAL et al., 2005).

Em nosso estudo, verificamos uma diferença de quase quatorze vezes entre o menor diâmetro (3.00 cm) e o diâmetro máximo (41.00 cm). No entanto, não usamos valores de D particularmente grandes ao construir nosso modelo. Além disso, a maioria de nossos indivíduos foram incluídos nas três primeiras menores classes de diâmetro. Por isso, entendemos que a biomassa acima do solo gerada pelo nosso modelo é consistente porque o peso dessas primeiras classes de diâmetro pode contrabalançar o viés desses indivíduos de maior diâmetro.

4.2 Comparação com os modelos da literatura

As espécies arbóreas têm diferentes características funcionais e variam em sua capacidade de armazenar carbono e biomassa (CONTI; DIAZ, 2013; DONG et al., 2018). Por isso a formulação de equações alométricas para um local específico é relevante para estimar

AGB com precisão (DJOMO; CHIMI, 2017). Em estudo com 175 indivíduos de 14 espécies, Mahmood et al. (2019) concluíram que o desenvolvimento de modelos locais derivados de uma amostra adequada de espécies representativas com variáveis preditoras adequadas pode melhorar a estimativa de biomassa acima do solo.

O poder preditivo do modelo desenvolvido no presente estudo foi testado com os modelos de Sampaio e Silva (2005), Zianis (2008), Brown et al. (1989) e Chave et al. (2005) para espécies mistas. Nosso modelo não se mostrou equivalente a nenhum desses modelos em termos de suas previsões para estimar AGB.

É importante destacar que a elaboração de equações alométricas de um habitat local deve garantir a precisão da estimativa da biomassa. Por isso, modelos alométricos simples, com poucas variáveis explicativas, podem não produzir estimativas precisas da biomassa (VIEILLEDENT et al., 2012). Nosso modelo utiliza as variáveis preditivas diâmetro à altura do peito e densidade da madeira.

4.3 Alometria no contexto de aquecimento global

Como os ecossistemas terrestres podem passar por mudanças climáticas significativas, incluindo déficits de umidade extremos e mais frequentes no Século 21, esta é uma questão que deve receber mais atenção da sociedade humana (PHILLIPS et al., 2010). Os principais riscos associados às tendências climáticas projetadas para o Século 21 incluem as perspectivas de estados climáticos futuros sem analogia atual e o desaparecimento de alguns climas existentes. Neste caso, há um iminente risco de extinção de espécies com distribuição climática e geográfica estreitas, e a perturbação de comunidades existentes (WILLIAMS et al., 2007). Até mesmo a vegetação adaptada aos rigores da escassez de umidade ambiental é atingida pelo aquecimento global. Temos registros de quanto os impactos de eventos de seca extrema provocam o declínio da curva de crescimento e levam à morte de árvores em florestas tropicais úmidas (PHILLIPS et al., 2009; PHILLIPS et al., 2010; MARENGO et al., 2011) e em florestas secas (ROTENBERG; YAKIR, 2010; LIU et al., 2013).

A maneira mais eficiente para sequestrar carbono é a recuperação de áreas degradadas, pois floresta secundária nos primeiros 37 anos estoca até 11 vezes mais carbono do que florestas mais antigas (SHIMAMOTO et al. 2014; POORTER et al. 2016; ZANINI et al., 2019), sendo a regeneração natural a estratégia com os melhores resultados em termos de serviços ecossistêmicos e sequestro de carbono (SHIMAMOTO et al. 2018). Como discutido anteriormente, a Caatinga sofre de perdas enormes da vegetação devido a ações antrópicas e

necessita de intervenções conservacionistas. Nesse sentido, nossa equação alométrica ajustada para a vegetação regional pode fornecer uma ferramenta que possibilite a avaliação de áreas da FTSS. O solo das FTSS densas sequestra uma porcentagem ainda maior dos estoques de C do que a própria biomassa acima do solo, sendo mais um motivo para investir na preservação e restauração de FTSS, a longo prazo (MENEZES et al., 2021).

Obtivemos a quantia estimada em 21.6 t de biomassa acima do solo para as 149 árvores, enquanto a estimativa para o Carbono fixado na biomassa arbórea é de 10.2 t-C. Padmakumar et al. (2018) avaliaram uma floresta tropical seca, na Índia, e os seus resultados mostraram que a AGB média estimada foi de 64.13 t ha⁻¹ e o estoque de carbono de 30.46 t-C ha⁻¹. O resultado deste estudo parece comparativamente maior do que os valores obtidos pelos citados autores, uma vez que não foi possível extrapolar nossos dados para um hectare. Isso possivelmente se deve ao fato das árvores avaliadas no referido estudo terem medidas muito contrastantes às medidas coletadas para este estudo. Os citados autores trabalharam com árvores cuja média do diâmetro à altura do peito variou entre 5.84 e 20.25 cm, enquanto o nosso DBH variou entre 3.00 e 41.00 cm.

O estoque de biomassa obtido no presente estudo está bem dentro dos limites das florestas tropicais secas. Estes resultados estão dentro da faixa de limites encontrados por Srinivas e Sundarapandian (2019) que estimaram entre 58,04 a 368,39 a biomassa em uma floresta tropical seca na Índia. A variação na quantia total de biomassa acumulada em ecossistemas florestais pode ocorrer devido a disponibilidade de água local, características climáticas e distúrbios antropogênicos (MURPHY; LUGO, 1986; BECKNELL et al., 2012). A biomassa acima do solo varia entre 39 a 334 Mg ha⁻¹ [39 a 334 t ha⁻¹] afirmam BECKNELL et al. (2012), após revisarem 44 estudos publicados e não publicados que estimam a biomassa acima do solo em florestas tropicais sazonais secas.

5 CONCLUSÃO

Utilizando as medições dendrométricas de 149 árvores da Caatinga, foi possível construir uma equação alométrica multi-espécie para calcular a biomassa acima do solo e a quantidade de carbono sequestrado. A equação alométrica representada pelo modelo 1: $AGB = 1.274 * (D)^{1.876} * (\rho)^{1.273}$ foi a que obteve os melhores resultados das estatísticas de qualidade do ajuste. A aplicação dessa equação em outras áreas da floresta da Caatinga, com espécies arbóreas e arbustivas semelhantes, poderá ajudar a validar a precisão do modelo.

Outra possibilidade para pesquisas futuras seria acrescentar mais áreas de estudo e

aumentar o número de amostras, assim criando uma equação multiespécie ainda mais robusta para a floresta da caatinga.

É imprescindível no contexto de aquecimento global, fortalecer as pesquisas na Floresta da Caatinga, que sofre tremenda pressão antrópica e representa uma parcela grande do território brasileiro para sequestro de carbono.

REFERÊNCIAS

- ABOAL, J.R., ARÉVALO, J.R., FERNÁNDEZ, A. Allometric relationships of different tree species and stand above ground biomass in the Gomera laurel forest (Canary Islands). *Flora*. 200, 264 – 274, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2004.11.001>.
- ALVAREZ, E., DUQUE, A., SALDARRIAGA, J., CABRERA, K., DE LAS SALAS, G., DEL VALLE, I., LEMA, A., MORENO, F., ORREGO, S., RODRÍGUEZ, L. Tree above-ground biomass allometries for carbon stocks estimation in the natural forests of Colombia. *Forest Ecology and Management* 267, 297–308, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.12.013>.
- ARAÚJO, E.J.G., LOUREIRO, G.H., SANQUETTA, M.N.I., CORTE, A.P.D., PÉLLICO NETTO, S., BEHLING, A. Allometric models to biomass in restoration areas in the Atlantic rain forest. *Floresta Ambiental* 25, e20160193, 2018. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.019316>.
- ARAÚJO, E.L., CASTRO, C.C., ALBUQUERQUE, U.P. Dynamics of Brazilian caatinga - a review concerning the plants, environment and people. *Functional Ecosystems and Communities* 1, 15 – 28, 2007. <https://www.researchgate.net/publication/282363215>.
- ARAÚJO FILHO, R.N., FREIRE, M.B.G.S., WILCOX, B.P., WEST, J.B., FREIRE, F.J., MARQUES, F.A., 2018. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry soils requires at least 60 years. *Forest Ecology and Management*, 407, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.002>.
- ASA BRANCA, ASSOCIAÇÃO DOS PROPRIETÁRIOS DE RPPN DO CEARÁ. Plano de Manejo Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN Não Me Deixes. Coordenação A.C.L.Cordeiro, 2012.
- BASUKI, T.M., VAN LAAKE, P.E., SKIDMORE, A.K., HUSSIN, Y.A. Allometric equations for estimating the aboveground biomass in tropical lowland Dipterocarp forests. *Forest Ecology and Management* 257, 1684 – 1694, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.027>.
- BECKNELL, J. M., KUCEK, L.K., POWERS, J. S. Aboveground biomass in mature and secondary seasonally dry tropical forests: A literature review and global synthesis. *Forest Ecology and Management* 276, 88 – 95, 2012. <https://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2012.03.033>
- BORCHERT, R., RIVERA, G., HAGNAUER, W. Modification of vegetative phenology in a tropical semi-deciduous forest by abnormal drought and rain. *Biotropica*. 34, 27 – 39, 2002.
- BROWN, S., GILLESPIE, A., LUGO, A.E. Biomass estimation methods for tropical forests with applications to forest inventory data. *Forest Science* 35, 881–902, 1989. <https://doi.org/10.1093/forestscience/35.4.881>.
- CASTELLETTI, C.H.M., SILVA, J.M.C., TABARELLI, M., SANTOS, A.M.M. Quanto ainda resta da Caatinga? Uma estimativa preliminar. *Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação* (ed. by J.M.C. da Silva, M. Tabarelli, M.T. Fonseca and L.V. Lins), pp. 91–100. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2004.
- CHAVE, J., ANDALO, C., BROWN, S., CAIRNS, M.A., CHAMBERS, J.Q., EAMUS, D., FOLSTER, H., FROMARD, F., HIGUCHI, N., KIRA, T., LESCURE, J.P., NELSON, B.W.,

OGAWA, H., PUIG, H., RIÉRA, B., YAMAKURA, T. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145, 87–99, 2005.

<https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.

CHAVE, J., RÉJOU-MÉCHAIN, M., BÚRQUEZ, A., CHIDUMAYO, E., COLGAN, M.S., DELITTI, W.B.C., DUQUE, A., EID, T., FEARNESIDE, P.M., GOODMAN, R.C., HENRY, M., MARTÍNEZ-YRÍZAR, A., MUGASHA, W.A., MULLER-LANDAU, H.C., MENCUCCINI, M., NELSON, B.W., NGOMANDA, A., NOGUEIRA, E.M., ORTIZ-MALAVASSI, E., PÉLISSIER, R., PLOTON, P., RYAN, C.M., SALDARRIAGA, J.G., VIEILLEDENT, G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20, 3177–3190, 2014.

<https://doi.org/10.1111/gcb.12629>

CONTI, G., DÍAZ, S. Plant functional diversity and carbon storage – an empirical test in semi-arid forest ecosystems. *J. Ecol.* 101, 18 – 28, 2013. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12012>.

CPRM SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Informe geoquímico das folhas Quixadá - Itapiúna: estado do Ceará. Organizado por Bruno Oliveira Calado. --- Fortaleza: CPRM, 2020. <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/21787>

CPRM SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Geologia e Recursos Minerais da Folha Itapipoca, Estado do Ceará. Organizado por Iramaia Furtado Braga, Íris Pereira Gomes - Fortaleza: CPRM, 2018. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/20426> .

DABA, D.E., SOROMESSA, T. Allometric equations for aboveground biomass estimation of *Diospyros abyssinica* (Hiern) F. White tree species. *Ecosystem Health Sustainability*. 5, 86–97, 2019. <https://doi.org/10.1080/20964129.2019.1591169>.

DJOMO, A. N., CHIMI, C.D. Tree allometric equations for estimation of above, below and total biomass in a tropical moist forest: case study with application to remote sensing. *Forest Ecology and Management*, 391, 184 – 193, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.02.022>.

DJOMO, A.N., PICARD, N., FAYOLLE, A., HENRY, M., NGOMANDAN, A., PLOTON, P., MCLELLAN, J., SABOROWSKI, J., ADAMOU, I., LEJENE, P. Tree allometry for estimation of carbon stocks in African tropical forests. *Forestry*. 89, 446 – 455, 2016.

<https://doi.org/10.1093/forestry/cpw025>.

DONG, L., ZHANG, L., LI, F. Additive biomass equations based on different dendrometric variables for two dominant species (*Larix gmelini* Rupr. and *Betula platyphylla* Suk.) in natural forests in the Eastern Daxing'an Mountains, Northeast China. *Forests*. 9, 261, 2018.

<https://doi.org/10.3390/f9050261>.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Dados climatológicos: Estação de Quixadá, 2003. Fortaleza: Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Agroindústria Tropical. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Documentos 88, 2004.

FAYOLLE, A., DOUCET, J.L., GILLET, J.F., BOURLAND, N. AND LEJEUNE, P. Tree allometry in Central Africa: Testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks. *Forest Ecology and Management*, 305, pp.29-37, 2013.

FEELEY, K.J., WRIGHT, S.J., SUPARDI, M.N.N., KASSIM, A.R., DAVIES, S.J. Decelerating growth in tropical forest trees. *Ecology Letters*. 10, 461 – 469, 2007.

<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01033.x>

FEYISA, K., BEYENE, S., MEGERSA, B., SAID, M.Y., JAN, DE L., ANGASSA, A. Allometric equations for predicting above-ground biomass of selected woody species to estimate carbon in East African rangelands. *Agroforest Systems*. 92, 599 – 621, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9997-9>

FIGUEIRÔA, J.M., PAREYN, F.G.C., ARAÚJO, E.L., SILVA, C.E., SANTOS, V.F., CUTLER, D.F., BARACAT, A., GASSON, P. Effects of cutting regimes in the dry and wet season on survival and sprouting of woody species from the semi-arid caatinga of northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*. 229, 294–303, 2006. <https://doi:10.1016/j.foreco.2006.04.008>

FUNCEME – FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. Dados dos postos pluviométricos do Ceará, 2020. Disponível em: <http://www.funceme.br/app/calendario/produto/municipios/maxima/diario?data=hoje>.

GARIGLIO, M.A., SAMPAIO, E.D.S., CESTARO, L.A., KAGEYAMA, P.Y. Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. Ministério do Meio Ambiente. Publicado pelo Serviço Florestal Brasileiro, Brasília, 2010. Disponível em: http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/5140/Livro_Uso-Sustent%E1vel-e-Conserva%E7%E3o-dos-Recursos-Florestais-da-Caatinga_MMA.pdf?sequence=1

GIBBS, H.K., BROWN, S., NILES, J.O., FOLEY, J. Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks: making REDD a reality. *Environmental Research Letters*, 2, 1–13, 2007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/2/4/045023>.

GONÇALVES, F.M.P., REVERMANN, R., GOMES, A.L., AIDAR, M.P.M., FINCKH, M., JUERGENS, N. Tree species diversity and composition of Miombo woodlands in South-Central Angola: a chronosequence of forest recovery after shifting cultivation. *International Journal of Forestry Research*. 2017, 1 – 13, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/6202093>.

GRIZ, L.M.S., MACHADO, I.C.S. Fruiting phenology and seed dispersal syndromes in caatinga, a tropical dry forest in the northeast of Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, 7, 303-321, 2001. <https://doi.org/10>

HAUFF, S.N. Representatividade do Sistema Nacional de Unidades de Conservação na Caatinga. Brasília: PNUD/Projeto BRA/00/021, 2010. Disponível em: https://issuu.com/canoadoocs/docs/representativconservcaat_shauff_rev

HARRIS, N.L., BROWN, S., HAGEN, S.C., SAATCHI, S.S., PETROVA, S., SALAS, W., HANSEN, M.C., POTAPOV, P.V., LOTSCH, A. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. *Science* 336, 1573–1576, 2012. <https://doi.org/10.1126/science.1217962>.

HENRY, M., BOMBELLI, A., TROTTA, C., ALESSANDRINI, A., BIRIGAZZI, L., SOLA, G., VIEILLEDENT, G., SANTENOISE, P., LONGUETAUD, F., VALENTINI, R., PICARD, N., SAINT-ANDRÉ, L. GlobAllomeTree: international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment. *iForest – Biogeosciences and Forestry* (early view): e1-e5, 2013. <https://doi.org/10.3832/ifor0901-006>.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de Vegetação do Brasil, 2004. Available at: ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/vegetacao/mapas/brasil/vegetacao.pdf.

INMET– INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, 2020. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.

IPCC. Climate change. The Physical Science Basis. Part of the Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M.M.B., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P.M.(eds). WMO/UNEP, 2013.

IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol.4: Agriculture, forestry and other land use (AFLOLU). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan, pp.1-83, 2006.

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica. Perfil básico municipal: Itapipoca. Fortaleza: IPECE, 2017a. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Itapipoca_2017.pdf

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica. Perfil básico municipal: Quixadá. Fortaleza: IPECE, 2017b. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Quixada_2017.pdf

IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica. Perfil básico municipal: Quixeramobim. Fortaleza: IPECE, 2017c. Available at: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Quixeramobim_2017.pdf

KEBEDE, B., SOROMESSA, T.. Allometric equations for aboveground biomass estimation of *Olea europaea* L. subsp. *cuspidata* in Mana Angetu forest. *Ecosystem Health Sustainability*. 4, 1–12, 2018. <https://doi.org/10.1080/20964129.2018.1433951>

KUYAH, S., SILESHI, G.W., ROSENSTOCK, T.S. Allometric models based on bayesian frameworks give better estimates of aboveground biomass in the miombo woodlands. *Forests*. 7, 1 – 13, 2016. <https://doi.org/10.3390/f7020013>

LAVOREL, S., GARNIER, E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16, 545 – 556, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2002.00664.x>

LEAL, I.R., SILVA, J.M.C., TABARELLI, M., LACHER JR., T.E. Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of Northeastern Brazil. *Conservation Biology*, 19, 701 – 706, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00703.x>.

LEOPOLD, A. A sand county almanac and sketches here and there. New York: Oxford University Press, 1949.

LIMA, A.L.A., RODAL, M.J.N. Phenology and wood density of plants growing in the semi-arid region of northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments*, 74, 1363 – 1373, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.05.009>.

LIMA, A.L.A., SAMPAIO, E.V.S.B., CASTRO, C.C., RODAL, M.J.N., ANTONINO, A.C.D., MELO, A.L. Do the phenology and functional stem attributes of woody species allow for the identification of functional groups in the semiarid region of Brazil? *Trees*. 26, 1605–1616, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00468-012-0735-2>.

LIU, H., WILLIAMS, A.P., ALLEN, C.D., GUO, D., WU, X., ANENKHONOV, O.A., LIANG, E., SANDANOV, D.V., YIN, Y., ZHAOHUAN, Q.I., BADMAEVA, N.K. Rapid warming accelerates tree growth decline in semiarid forests of Inner Asia. *Global Change Biology* 19, 2500–2510, 2013. <https://doi.org/10.1111/gcb.12217>

MAHMOOD, H., SIDDIQUE, M.R.H., ISLAM, S. M. Z., ABDULLAH, S. M. R., MATIEU, H., IQBAL, MD. Z., AKHTER, M. Applicability of semi-destructive method to derive allometric model for estimating aboveground biomass and carbon stock in the Hill zone of Bangladesh. *Journal of Forestry Research*, 2019. doi:10.1007/s11676-019-00881-5

MARENGO, J.A., TOMASELLA, J., ALVES, L.M., SOARES, W.R., RODRIGUEZ, D.A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, 38, L12703, 2011. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436> .

MARSHALL, A.R., WILLCOCK, S., PLATTS, P.J., LOVETT, J.C., BALMFORD, A., BURGESS, N.D., LATHAM, J.E., MUNISHI, P.K.T., SALTER, R., SHIRIMA, D.D., LEWIS, S.L. Measuring and modelling above-ground carbon and tree allometry along a tropical elevation gradient. *Biological Conservation*, 154, 20 – 33, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.03.017>

MATIAS, P. C., GAMARRA-ROJAS, G., BLUM, J., MATTOS, J.L.S. Fatores de conversão para estudos de eficiência energética agroecológica no semiárido brasileiro. In: Carmen Rejane Flores; Manuel González de Molina Navarro; Valquiria Conti. (Org.). *Metabolismo social e agrário*. 1 ed.Santa Maria, RS: Arco Editores, v.1, p.91-125, 2022. <http://dx.doi.org/10.48209/978-65-89949-70-5>

MENDES, K.R., CAMPOS, S., SILVA, L.L., MUTTI, P.R., FERREIRA, R.R., MEDEIROS, S.S., PEREZ-MARIN, A.M., MARQUES, T.V., RAMOS, T.M., VIEIRA, M.M.L., OLIVEIRA, C.P., GONÇALVES, W.A., COSTA, G.B., ANTONINO, A.C.D., MENEZES, R.S.C., BEZERRA, B.G., SILVA, C.M.S. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. *Scientific Reports*. 10, 9454, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>.

MENEZES, R.S.C., SALES, A.T., PRIMO, D.C., DE ALBUQUERQUE, E.R.G.M., DE JESUS, K.N., PAREYN, F.G.C., DA SILVA SANTANA, M., DOS SANTOS, U.J., MARTINS, J.C.R., ALTHOFF, T.D. AND DO NASCIMENTO, D.M. Soil and vegetation carbon stocks after land-use changes in a seasonally dry tropical forest. *Geoderma*, 390, p.114943, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.114943>

MENSAH, S., VELDTMAN, R., SEIFERT, T. Allometric models for height and aboveground biomass of dominant tree species in South African Mistbelt forests. *Southern Forests*, 79, 19 – 30, 2017. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1225187>

MOLTO, Q., HÉRAULT, B., BOREUX, J.J., DAULLET, M., ROUSTEAU, A., ROSSI, V. Predicting tree heights for biomass estimates in tropical forests - a test from French Guiana. *Biogeosciences*, 11,3121-3130, 2014. <http://dx.doi.org/10.5194/bg-11-3121-2014>.

MURPHY, P.G., LUGO, A.E. Ecology of tropical dry forest. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17, 67 – 88, 1986. <https://www.jstor.org/stable/2096989>

NÁVAR, J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 257, 427 – 434, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.09.028>

NOGUEIRA, F.C.B., DOBE, E.K., SILVA FILHO, J.B., RODRIGUES, L.S. Allometric equations to estimate aboveground biomass of *Dalbergia cearensis* species in the Brazilian seasonally dry tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 484, 1 – 11, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118920>.

- OLIVEIRA, G., ARAÚJO, M.B., RANGEL, T.F., ALAGADOR, D., DINIZ-FILHO, J.A.F. Conserving the Brazilian semiarid (Caatinga) biome under climate change. *Biodivers. Conserv.* 21, 2913 – 2926, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10531-012-0346-7>
- OLIVEIRA, G.C., FRANCELINO, M.R., ARRUDA, D.M., FERNANDES-FILHO, E.I., SCHAEFER, C.E.G. R. Climate and soils at the Brazilian semiarid and the forest-caatinga problem: new insights and implications for conservation. *Environmental Research Letters*, 14, 104007, 2019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3d7b>
- PACHECO, A.A., NEVES, A.C.O., FERNANDES, G.W. Uneven conservation efforts compromise Brazil to meet the target 11 of convention on biological diversity. *Perspectives in Ecology and Conservation*. 16, 43 – 48, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.12.001>
- PADMAKUMAR, B., SREEKANTH, N.P., SHANTHIPRABHA, V., PAUL, J., SREEDHARAN, K., AUGUSTINE, T., JAYASOORYAN, K.K., RAMESHAN, M., MOHAN, M., RAMASAMY, E.V., THOMAS, A.P. Tree biomass and carbon density estimation in the tropical dry forest of Southern Western Ghats, India. *iForest – Biogeosciences and Forestry* 11, 534 – 541, 2018. <https://doi.org/10.3832/ifer2190-011>
- PEREIRA JÚNIOR, L.R., ANDRADE, E.M., PALÁCIO, H.A.Q., RAYMER, P.C.L., RIBEIRO FILHO, J.C., PEREIRA, F.J.S. Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil. *Revista Ciência Agronômica*. 47, 32 – 40, 2016. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160004>
- PHILLIPS, O.L., ARAGÃO, L.E.O.C., LEWIS, S.L., FISHER, J.B., LLOYD, J., LÓPEZ-GONZÁLEZ, G., MALHI, Y., MONTEAGUDO, A., PEACOCK, J., et al. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science*, 323, 1344–1347, 2009.
- PHILLIPS, O.L., VAN DER HEIJDEN, G., LEWIS, S.L., et al. Drought–mortality relationships for tropical forests. *New Phytol* 187,631–646, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03359.x>
- PICARD, N., BOSELA, F.B., ROSSI, V. Reducing the error in biomass estimates strongly depends on model selection. *An. For. Sc.* 72, 811 – 823, 2015. <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0434-9>.
- PICARD, N., SAINT-ANDRÉ, L., HENRY, M. Manual for Building Tree Volume and Biomass Allometric Equations. From Field Measurement to Prediction. FAO, Rome, Italy and CIRAD, Montpellier, France, 2012. <http://www.fao.org/docrep/018/i3058e/i3058e.pdf>.
- POORTER, L., BONGERS, F., AIDE, T.M., ZAMBRANO, A.M.A., BALVANERA, P., BECKNELL, J.M., CRAVEN, D. Biomass resilience of neotropical secondary forests. *Nature* 530:211–214, 2016. <https://doi.org/10.1038/nature16512>
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2022. Disponível em: <<https://www.R-project.org>> (Acessado em Outubro de 2022).
- RAMOS, M.A., MEDEIROS, P.M., ALMEIDA, A.L.S., FELICIANO, A.L.P., ALBUQUERQUE, V.P. Use and knowledge of fuelwood in an area of Caatinga vegetation in NE Brazil. *Biom. Bioe.* 32, 510 – 517, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.11.015>.
- ROTENBERG, E., YAKIR, D. Contribution of semi-arid forests to the climate system. *Science* 327,451–454,2010. <https://doi.org/10.1126/science.1179998>.
- ROSNOW, R.L., ROSENTHAL, R. Beginning behavioral research: a conceptual primer. Englewood Cliffs (NJ): Pearson/Prentice Hall. 5th ed., 2005.

- ROSENTHAL, R., ROSNOW, R. L. Artifacts in behavioral research: Robert Rosenthal and Ralph L. Rosnow's classic books. Oxford: University Press, 2009.
- SAMPAIO, E.V.S.B., SILVA, G.C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. *Acta Bot. Bras.* 19, 935 – 943, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062005000400028>.
- SANTOS, M. G., OLIVEIRA, M. T., FIGUEIREDO, K. V., FALCÃO, H. M., ARRUDA, E. C. P., ALMEIDA-CORTEZ, J., SAMPAIO, E.V.S.B., OMETTO, J.P.H.B., MENEZES, R.S.C., OLIVEIRA, A.F.M., POMPELLI, M. F., ANTONINO, A.C.D. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate change? *Theor. Exp. Plant Physiol.* 26, 83-99, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>.
- SEGURA, M., KANNINEN, M. Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica.* 37, 2–8, 2005.
- SHIMAMOTO C.Y., BOTOSSO, P.C., MARQUES, MC. How much carbon is sequestered during the restoration of tropical forests? Estimates from tree species in the Brazilian Atlantic forest. *Forest Ecology and Management* 329:1–9, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.06.002>
- SHIMAMOTO, C.Y., PADIAL, A.A., DA ROSA, C.M. AND MARQUES, M.C. Restoration of ecosystem services in tropical forests: A global meta-analysis. *PLoS One*, 13(12), p.e0208523, 2018. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208523>
- SILVA, J.M.C.D., BARBOSA, L.C.F., LEAL, I.R. AND TABARELLI, M. The Caatinga: understanding the challenges. In *Caatinga* (pp. 3-19). Springer, Cham, 2017.
- SPANNL, S., VOLLAND, F., PUCHA, D., PETERS, T., CUEVA, E. AND BRÄUNING, A. Climate variability, tree increment patterns and ENSO-related carbon sequestration reduction of the tropical dry forest species *Loxopterygium huasango* of Southern Ecuador. *Trees*, 30(4), pp.1245-1258, 2016.
- SRINIVAS, K., SUNDARAPANDIAN, S. Biomass and carbon stocks of trees in tropical dry forest of East Godavari region, Andhra Pradesh, India. *Geology, Ecology, and Landscapes*.3,114 – 122, 2019. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1522837>
- TEOBALDELLI, M., SOMOGYI, Z., MIGLIAVACCA, M., USOLTSEV, V.A. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology Management* 257, 1004–1013, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.11.002>.
- VAHEDI, A.A., MATAJI, A., BABAYI-KAFAKI, S., ESHAGHI-RAD, J., HODJATI, S.M., DJOMO, A. Allometric equations for predicting aboveground biomass of beech-hornbeam stands in the Hyrcanian forests of Iran. *J. For. Sci.* 60, 236-247, 2014. <https://doi.org/10.17221/39/2014-JFS>.
- VIEILLEDENT, G., VAUDRY, R., ANDRIAMANOHISOA, S.F.D., RAKOTONARIVO, O.S., RANDRIANASOLO, H.Z., RAZAFINDRABE, H.N., RAKOTOARIVONY, C.B., EBELING, J., RASAMOELINA, M. A universal approach to estimate biomass and carbon stock in tropical forests using generic allometric models. *Ecol. Appl.* 22, 572–583, 2012. <https://doi.org/10.1890/11-0039.1>
- WAGNER, F., ROSSI, V., AUBRY-KIENTZ, M., BONAL, D., DALITZ, H., GLINIARS, R., STAHL, C., TRABUCCO, A. AND HERAULT, B. Pan-tropical analysis of climate effects on seasonal tree growth. *PLoS One*, 9(3), p.e92337, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092337>

WILLIAMS, J.W., JACKSON, S.T., KUTZBACH, J.E. Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* 104, 5738 – 5742, 2007. <https://doi.org/10.1073/pnas.0606292104> .

XIANG, W., ZHOU, J., OUYANG, S., ZHANG, S., LEI, P., DENG, X., FANG, X., FORRESTER, D.I. Species-specific and general allometric equations for estimating tree biomass components of subtropical forests in southern China. *European Journal of Forest Research.* 135, 963 – 979, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0987-2>.

ZANINI, A.M., MAYRINCK, R.C., VIEIRA, S.A. AND RODRIGUES, R.R. Carbon content and allometric models to estimate aboveground biomass for forest areas under restoration. *Restoration Ecology*, 30(5), p.e13591, 2022. <https://doi.org/10.1111/rec.13591>

ZIANIS, D. Predicting mean aboveground forest biomass and its associated variance. *Forest Ecology and Management* 256, 1400–1407, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.002> .