

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIA HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE

VIVIANE PEDROSO GOMES

AVALIAÇÃO ESPACIAL DE ESPÉCIES VEGETAIS EM ÁREAS DE CAATINGA COM
DADOS LiDAR

RECIFE

2017

VIVIANE PEDROSO GOMES

**AVALIAÇÃO ESPACIAL DE ESPÉCIES VEGETAIS EM ÁREAS DE CAATINGA
COM DADOS LiDAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Área de concentração: Gestão de Políticas Ambientais

Orientadora: Josiclêda Domiciano Galvêncio
Coorientadoras: Valéria Sandra de Oliveira Costa e Magna Soelma Beserra de Moura

Recife

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Janeide Pereira da Silva, CRB4-1262

G633a Gomes, Viviane Pedroso.
Avaliação espacial de espécies vegetais em áreas de caatinga com dados
LiDAR / Viviane Pedroso Gomes. – 2017.
65 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Josiclêda Domiciano Galvêncio.
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Valéria Sandra de Oliveira Costa.
Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Magna Soelma Beserra de Moura.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, CFCH.
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Recife,
2017.
Inclui Referências.

1. Meio ambiente. 2. Caatinga. 3. Dendrometria. 4. Equações alométricas.
5. Estimativa de parâmetros. I. Galvêncio, Josiclêda Domiciano
(Orientadora). II. Costa, Valéria Sandra de Oliveira (Coorientadora). III.
Moura, Magna Soelma Beserra de (Coorientadora). IV. Título.

363.7 CDD (22. ed.)

UFPE (BCFCH2017-160)

VIVIANE PEDROSO GOMES

**AVALIAÇÃO ESPACIAL DE ESPÉCIES VEGETAIS EM ÁREAS DE CAATINGA
COM DADOS LiDAR**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em: 22 / 02 / 2017

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Emanuel Araújo Silva
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Werônica Meira de Souza
Universidade Federal Rural de Pernambuco

*Dedico este trabalho a meu pai,
minha mãe e meu irmão.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos de minha vida e me ajudar a realizar meus sonhos. Ao meu pai José Rivaldo Gomes Filho, por ter sido um excelente exemplo, por todo esforço feito por mim, todo carinho e amor. Minha mãe Cristiane Pedrozo Barbosa Gomes, por sempre estar ao meu lado me incentivando, apoiando e torcendo, ao meu irmão Vitor Pedrozo Gomes, por todo apoio. E a toda minha família.

À Universidade Federal de Pernambuco pela estrutura fornecida e por contribuir com minha formação profissional. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo, que foi de fundamental importância para desenvolvimento da pesquisa.

A Pedro Ferreira, meu namorado, a pessoa com quem compartilho a vida, obrigada por ter sido companheiro em todos os momentos, por todo amor, carinho, paciência, apoio e incentivo.

À minha sogra Zélia Maria por todo apoio e incentivo, meu sogro Ascendino Filho pelo apoio, meu cunhado Henrique Ferreira por toda ajuda, minha concunhada Mariana Cavalcanti pelo incentivo e minha Sobrinha Maria Júlia por fazer parte da minha vida.

À minha orientadora Josiclêda Domiciano Galvêncio, por todo aprendizado que me proporciona, por toda atenção e paciência. As minhas coorientadoras Valéria Sandra de Oliveira Costa, por toda ajuda, atenção e contribuições para a pesquisa e Magna Soelma Bezerra de Moura por todo suporte para realização do trabalho e contribuições.

Aos professores componentes da banca Dr. Emanuel Araújo Silva, Dra. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel e Dra. Werônica Meira de Souza por aceitarem o convite para participar e por todas as contribuições que foram feitas durante a primeira banca de qualificação.

Aos amigos do Laboratório SERGEO, por todo apoio, ajuda, conversas e momentos. Em especial, Yenê Medeiros, Ygor Cristiano, Rodrigo de Queiroga, Jadson Freire, Luciana Mayla, Pedro Paulo, Any Sena, Kézia Mikaelly, Elisabeth Cavalcanti, Aldenice Correia, Joélia Natália, Julliana Machado, Katarina Pinheiro, Gysllayne Farias, Isabela Oliveira, Sidney Campelo, Carlos Avelar, Wladimir Queiroz e Tiago Henrique.

Ao Professor da Universidade de Pernambuco Dr. Antonio Marcos dos Santos por sempre dispor de tempo para ajudar no que fosse preciso e por todo conhecimento proporcionado desde a fase de graduação.

Aos amigos que fiz no CAVest, por todos nossos momentos, e por me mostrar sempre que não podemos desistir dos nossos sonhos. Em especial, Andreza Aguiar, Elba Alves, Priscila Tavares, Edvânia Alves, Crissia Santana, Iloane Lima, Bruno Lopes, Alisson Oliveira, João Antônio, Emanuel Germano, Cassia Andrade, Camilla Peixoto, Érica Lima, Clesia Melo, Danilo Amorim e Jaime Nascimento. A David Filipe, professor e amigo, que se tornou um exemplo e me incentivou muito durante o curso.

Às minhas amigas e irmãs, Luana Pereira, Flávia Félix e Gislane Silva, que mesmo distantes sempre estão torcendo por mim.

Às minhas amigas Cristyane Nathália, Bruna Tavares, Amanda Lima e Odineide Soares por todo apoio, incentivo e compreensão.

RESUMO

A frequente degradação do bioma Caatinga tem resultado na redução da produção e estocagem de biomassa vegetal. O desenvolvimento de estudos adequados para compreensão desse tipo de problema, esbarra na dificuldade de obtenção de dados em campo. Os avanços no campo tecnológico vêm permitindo aos cientistas obter informações das características verticais dos biomas através da utilização de técnicas de sensoriamento remoto. Nesse sentido, o objetivo desse estudo é analisar a variação espacial da estrutura vertical e biomassa da vegetação de caatinga, utilizando dados do sensor light detection and ranging (LiDAR). Para tanto, foram utilizados dados obtidos em campo de variáveis dendrométricas da caatinga e dados obtidos através de tecnologia laser, com o intuito de realizar estimativas de altura total das árvores, e biomassa lenhosa, bem como propor um modelo para estimativa de diâmetro à altura do peito (DAP) utilizando regressão e correlação. Os resultados de altura total das árvores observados em campo e estimados com LiDAR apresentaram maior ocorrência de indivíduos com alturas entre 1 e 6 m. O modelo de regressão desenvolvido para estimativa de diâmetro a altura do peito, apresentou correlação de 0,93 com os dados observados em campo. Com a estimativa de biomassa lenhosa através do uso de equação alométrica para dados de campo e estimados com LiDAR pôde-se subdividir a biomassa presente por grupos de espécie e por grupos de altura. Dessa forma, fica evidenciado o potencial da utilização dos dados LiDAR para estimativa de altura das árvores da caatinga, bem como a utilização do modelo de regressão desenvolvido para estimativa de DAP, tornando possível a estimativa de biomassa lenhosa por meio de equação alométrica para espécies da caatinga, sem a necessidade de métodos destrutivos.

Palavras-chave: DAP. Dendrometria. Estimativa. Equações alométricas.

ABSTRACT

The frequent degradation of the Caatinga biome has resulted in reduced production and storage of plant biomass. The development of adequate studies to understand this type of problem, faces the difficulty of obtaining data in the field. Advances in the field of technology have enabled scientists to obtain information on the vertical characteristics of biomes through the use of remote sensing techniques. Data obtained by laser have been used by researchers to obtain information related to the vertical structure of the biomes. In this sense, the objective of this study is to analyze the spatial variation of the vertical structure and biomass of the caatinga vegetation, using data from the light detection and ranging (LiDAR) sensor. In order to do so, we used field data of dendrometric variables of the caatinga and data obtained through laser technology, with the purpose of estimating total height of trees and woody biomass, as well as to propose a model for estimating diameter at the diameter at breast height (DBH) using regression and correlation. The results of total height of the trees observed in the field and estimated with LiDAR corresponded to reality and showed a higher occurrence of individuals with heights between 1 and 6 m. The regression model developed for the estimation of diameter at breast height showed a correlation of 0.93 with the data observed in the field. With the estimation of woody biomass through the use of allometric equation for field data and estimated with LiDAR, it was possible to subdivide the present biomass by groups of species and by height groups. In this way, the potential of using LiDAR data to estimate the height of the caatinga trees is demonstrated, as well as the use of the regression model developed for the estimation of DBH, making possible the estimation of woody biomass by means of allometric equation for Without the need for destructive methods.

Keywords: DBH. Dendrometry. Estimation. Allometric equations.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização geográfica do município de Petrolina – PE.....	24
Figura 2 - Espacialização dos indivíduos medidos em campo.....	26
Figura 3 - Área com dados LiDAR disponíveis para o município de Petrolina PE.....	27
Figura 4 - Classificação da vegetação para o município de Petrolina – PE, localização da quadriculas LiDAR utilizadas na análise e área de coleta de dados em campo.....	28
Figura 5 - Variação do Modelo Digital de Elevação (a) e CHM – Canopy Height Model (b), para quadricula LiDAR 1.....	31
Figura 6 - Variação do Modelo Digital de Elevação CHM – Canopy Height Model, para quadricula LiDAR 2.....	31
Figura 7 - Variação do Modelo Digital de Elevação CHM – Canopy Height Model, para quadricula LiDAR 3.....	32
Figura 8 - Variação do Modelo Digital de Elevação CHM – Canopy Height Model, para quadricula LiDAR 4.....	33
Figura 9 - Variação espacial das árvores, (A) usando grid de 1m, (B) usando grid de 2m, (C) usando grid de 3m.....	34
Figura 10 - Localização geográfica das áreas experimentais (Embrapa Semiárido e GTIMAGEO).....	44
Figura 11 - Área de vegetação de caatinga no Sítio de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) na Embrapa Semiárido em Petrolina – PE (Foto de 22/09/2015).....	45
Figura 12 - Área de vegetação de caatinga na estação experimental do Grupo de trabalho em monitoramento ambiental geotecnologia e ensino – GTIMAGEO, Casa Nova – BA (Foto de 08/11/2015).....	45
Figura 13 - Relação entre dados observados em campo e estimados pelo modelo cúbico para estimativa de DAP.....	50
Figura 14 - Localização das coletas de campo.....	59
Figura 15 - Localização dos dados laser.....	60
Figura 16 - (a) Vegetação no Sítio PELD na Embrapa Semiárido durante a estação chuvosa. (b) Vegetação na área experimental do grupo GTIMAGEO durante a estação seca.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre resultados de altura obtidos em campo e estimados com dados LiDAR.....	34
Tabela 2 - Distribuição dos indivíduos em campo por parcela e classe de altura.....	34
Tabela 3 - Total de Indivíduos identificados nas parcelas e altura máxima encontrada.....	35
Tabela 4 - Indivíduos identificados nas parcelas subdivididos por classe de altura.....	36
Tabela 5 - Porcentagem dos indivíduos identificados nas parcelas subdivididos por classe de altura.....	36
Tabela 1 - Parâmetros para o ajuste dos modelos analisados.....	48
Tabela 2 - Valor Ponderado e pesos atribuídos aos Parâmetros estatísticos.....	49
Tabela 3 - Classes diamétricas obtidas com o modelo cúbico.....	51
Tabela 1 - Espécies identificadas em área preservada.....	65
Tabela 2 - Biomassa total por grupos de espécies em áreas preservadas.....	67
Tabela 3 - Espécies identificadas em área degradada.....	68
Tabela 4 - Biomassa total por grupos de espécies em área degradada.....	69
Tabela 5 - Total de indivíduos identificados por quadrícula LiDAR.....	70
Tabela 6 - Total de indivíduos e biomassa estimada com dados LiDAR por classe diamétrica.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGL - Above Ground Level

3D - Tridimensional

ALS - Airborne Laser Scanning

CAP - Circunferência à Altura Do Peito

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

CHM - Canopy Height Model

DAP - Diâmetro à Altura do Peito

GTIMAGEO - Grupo de Trabalho em Monitoramento Ambiental Geotecnologia e Ensino

GPS - Sistemas de Informação Geográfica

LiDAR - Light Detection And Ranging

MDE - Modelo Digital de Elevação

PELD - Pesquisas Ecológicas de Longa Duração

PE3D - Projeto Pernambuco Tridimensional

PIB - Produto Interno Bruto

PROBIO - Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira

SERGEIO - Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento

SIG - Sistema de Informação Geográfica

SPSS - Statistical Product And Service Solutions

SR - Sensoriamento Remoto

TXT - Text File Extension

UFPE - Universidade Federal de Pernambuco

VCAN - Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis

VP - Valor Ponderado

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Objetivo geral	15
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	VARIAÇÃO ESPACIAL DA ALTURA INDIVIDUAL PARA ÁRVORES DA CAATINGA COM DADOS LiDAR	16
2.1	Introdução	16
2.2	Material e métodos	17
2.2.1	Caracterização da área de estudo	17
2.2.2	Dados de campo	18
2.2.3	Aquisição do dados LiDAR e escolha das áreas para análise	20
2.2.4	Processamento dos dados LiDAR	22
2.3	Resultados e discussão	24
2.3.1	Modelo Digital de Elevação (MDE) e Modelo de Altura das copas (CHM)	24
2.3.2	Comparação entre os dados de campo e as estimativas	27
2.3.3	Altura medida em campo	28
2.3.4	Altura estimada com dados LiDAR	28
2.4	Conclusões	30
3.	ESTIMATIVA DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO EM FLORESTA DE CAATINGA COM A UTILIZAÇÃO DE MODELOS ALOMÉTRICOS	31
3.1	Introdução	31
3.2	Material e métodos	33
3.2.1	Localização e caracterização da área de estudo	33
3.2.2	Coleta de dados em campo	34
3.2.3	Obtenção do diâmetro à altura do peito (DAP)	35
3.2.4	Desenvolvimento de modelo para estimativa de diâmetro à altura do peito (DAP) calibrado para floresta de Caatinga	36
3.2.5	Validação da equação de DAP	37
3.2.6	Estimativa de diâmetro à altura do peito (DAP) a partir de dados LiDAR	37
3.3	Resultados e discussão	38
3.3.1	Modelo para estimativa de diâmetro à altura do peito (DAP)	38
3.3.2	Comparação dos dados observados e estimados de DAP	39
3.3.3	Diâmetro estimado a partir dos dados LiDAR	40
3.4	Conclusões	42

4.	ESTIMATIVA DE BIOMASSA ARBÓREA EM VEGETAÇÃO DE CAATINGA COM O USO DE EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS.....	43
4.1	Introdução.....	43
4.2	Material e métodos.....	44
4.2.1	Caracterização da área de estudo.....	45
4.2.2	Obtenção de dados de campo.....	46
4.2.3	Cálculo do diâmetro à altura do peito (DAP)	47
4.2.4	Obtenção de dados LiDAR.....	48
4.2.5	Estimativa de altura e diâmetro à altura do peito com dados LiDAR.....	48
4.2.6	Estimativa de biomassa arbórea.....	49
4.3	Resultados e discussão	50
4.3.1	Biomassa estimada com dados de campo	50
4.3.1.1	Dados coletados em área de vegetação de caatinga preservada	50
4.3.1.2	Dados coletados em área de vegetação de caatinga antropizada	53
4.3.2	Biomassa estimada com dados LiDAR	55
4.4	Conclusões.....	58
5	CONCLUSÕES GERAIS	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO GERAL

No Semiárido brasileiro, a área preservada do bioma Caatinga cobre cerca de 40% da superfície original, encontrando-se em avançado estado de deterioração no restante da região. A degradação desse bioma é frequentemente associada às atividades de pecuária extensiva, extração de lenha para diversos usos e práticas agrícolas (GARIGLIO et al., 2010). De acordo com Costa et al. (2009) esse processo tem resultado na redução da produção e estocagem de biomassa vegetal, contribuindo para a maior exposição dos solos e alteração na dinâmica de assimilação de carbono pela vegetação.

O desenvolvimento de estudos adequados para uma compreensão mais ampla do funcionamento do bioma tem esbarrado na dificuldade de obtenção de dados em campo, além dos altos custos que os envolvem. Esse quadro reduz a disponibilidade de informações sobre a vegetação de caatinga. Informações das características verticais (altura da planta, diâmetro do dossel e diâmetro na altura do peito) da vegetação, consideradas de importância estratégica, praticamente inexistem. Todavia, essas informações são de grande importância para a quantificação da biomassa e do sequestro de carbono (LIMA JÚNIOR et al., 2014).

Por outro lado, os comprovados avanços no campo tecnológico vêm permitindo aos cientistas obter informações das características verticais dos biomas por meio da utilização de técnicas de sensoriamento remoto. Essas tecnologias têm facilitado a obtenção de informações em grande quantidade e em extensas áreas geográficas, muitas vezes, menos acessíveis. Além disso, verifica-se uma redução nos custos de financiamento para coleta de dados em campo. Porém, para a estimativa e validação de dados da estrutura vertical de plantas, as informações obtidas de forma tradicional ainda são de grande importância, pois são elas que permitem desenvolver e avaliar modelos que estimam altura e diâmetro do dossel das vegetações (GALVÍNCIO; POPESCU, 2016).

Mais recentemente, diversos pesquisadores têm utilizado dados LiDAR para a obtenção de parâmetros de estrutura vertical dos biomas, em especial de florestas temperadas (SRINIVASAN et al., 2014), (ZHAO et al., 2013), (KAARTINEN et al., 2012), (POPESCU, 2007), (POPESCU; WYNNE, 2004), (POPESCU; WYNNE; SCRIVANI, 2004) (POPESCU; WYNNE; NELSON, 2003), (POPESCU; WYNNE; NELSON, 2002). Estes estudos também trazem um alerta importante para os efeitos que as práticas, como a conversão de florestas naturais em pastos, agricultura e solos expostos podem causar sobre o clima.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) vem divulgando relatórios que apontam para o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera nos últimos séculos e uma

tendência de crescimento para os próximos anos (IPCC, 2013). Nesse sentido, o IPCC também ressalta a importância dos ecossistemas para o controle de CO₂ disperso na atmosfera. Sabe-se que as plantas têm uma importante função no sequestro de CO₂ da atmosfera. Por outro lado, ressalta-se que a quantidade de CO₂ sequestrado pelas florestas depende essencialmente da quantidade de biomassa existente nelas. Entretanto, a estimativa de biomassa em áreas florestais no mundo é escassa ou imprecisa, em especial em áreas de caatinga. Dessa forma, os métodos para a estimativa da estrutura vertical de florestas e dos parâmetros biofísicos de seus indivíduos precisam ser aplicados em diferentes escalas geográficas, para melhor analisar os efeitos das mudanças climáticas e propor alternativas de mitigação (SILVEIRA et al., 2007).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a variação espacial da estrutura vertical e biomassa da vegetação de caatinga, utilizando dados LiDAR.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Determinar a variação espacial da altura de espécies arbóreas em vegetação de semiárido;
2. Desenvolver modelo para estimativa de diâmetro à altura do peito calibrado para a floresta caatinga;
3. Estimar a biomassa arbórea em áreas do bioma Caatinga.

2 VARIAÇÃO ESPACIAL DA ALTURA INDIVIDUAL PARA ÁRVORES DA CAATINGA COM DADOS LiDAR

2.1 Introdução

A composição e estrutura de uma floresta são características difíceis de se avaliar, principalmente em áreas extensas e de difícil acesso, porém são informações importantes e necessárias na orientação do manejo florestal. Atualmente, ferramentas como sensoriamento remoto (SR), sistemas de posicionamento global (GPS) e sistemas de informação geográfica (SIG) vêm facilitando a coleta e manipulação desse tipo de informação (ZIMBLE et al., 2003).

O sistema de varredura a laser aerotransportado ou Light Detection And Ranging (LiDAR), por exemplo, é uma das tecnologias de sensoriamento remoto ativo, com funcionamento baseado na utilização de um feixe de laser, que é emitido em direção ao terreno para obtenção de coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície. Essa técnica vem se mostrando bastante promissora para estudos relacionados a inventário florestal e estimativa de variáveis dendrométricas da vegetação (RODRIGUEZ et al., 2010).

A utilização da tecnologia à laser, como o LiDAR, explora as características de nuvem de pontos resultante da interceptação dos feixes de laser pelo sensor de alta precisão que determina a altura das interceptações em relação a superfície do terreno, levando em consideração o tempo de duração entre a emissão e o retorno do pulso (ZONETE; RODRIGUEZ; PACKALÉN, 2010).

O desenvolvimento de novas técnicas para estudos relacionados a contagem de árvores individuais bem como quantificação do estoque de carbono e biomassa florestal precisam ser contínuos para o Brasil, assim como a validação dos já existentes para as condições brasileiras, visando a consolidação do uso desta tecnologia no setor florestal. Por meio dos dados LiDAR podem ser obtidas variáveis como, altura, densidade de plantio, diâmetro da copa, distribuição espacial das plantas, entre outras (OLIVEIRA et al., 2014).

A altura constitui uma importante característica da árvore, sendo considerada importante indicador de sustentabilidade ambiental de uma floresta e pode ser medida ou estimada. Segundo Silva et al. (2012), a medição ou estimativa de altura das árvores pode servir como importante indicador da qualidade produtiva de um local, uma vez que a estratificação vertical da floresta influencia a riqueza, diversidade, crescimento e produção de biomassa.

Entretanto a utilização de dados laser não descarta totalmente a realização de atividades de campo, pois a obtenção de estimativas mais precisas, demanda a necessidade de ajustes com

dados coletados nas áreas de estudo. Países como Canadá, Estados Unidos, Noruega, Finlândia, Suíça e Alemanha lideram as pesquisas sobre a aplicação do sensor LiDAR em área florestal (GIONGO et al., 2010). No Brasil, estudos que utilizam a tecnologia LiDAR para estimativas de variáveis florestais ainda são escassos, com destaque para os trabalhos de Giongo et al. (2012) que utilizaram dados LiDAR para estimativa de altura das copas para um fragmento de floresta em Curitiba – PR e Macedo (2009) que avaliou a estimativa volumétrica de povoamentos de *Eucalyptus* sp. em fazendas do município de Igaratá – SP.

Zandoná, Lingnau e Nakajima (2008), utilizando dados da tecnologia LiDAR para estimativa de biomassa florestal e quantificação de carbono em uma estação experimental no município de Pinhais – PR, obtiveram altura individual, área e diâmetro da copa após o processamento dos dados e a estimativa do Diâmetro na Altura do Peito (DAP) a partir de correlações e modelos de regressão. Ao considerar todas as parcelas medidas em campo, conseguiram um percentual de acerto de 82,8%, demonstrando que é possível a identificação de árvores individuais com alta precisão através da tecnologia LiDAR.

Um método para avaliar a altura da base da copa em árvores individuais com dados LiDAR para florestas típicas do sudeste dos Estados Unidos foi desenvolvido por Popescu e Zhao (2008). Para tanto foi utilizado o *software* TreeVaW para localizar as árvores individualmente e obter medidas de altura e largura da copa. A partir de faixas de altura delimitadas pôde-se analisar a estrutura vertical das copas comparando com medições realizadas em campo. Modelos de regressão linear foram capazes de explicar 80% da variabilidade existente na altura da copa de árvores individuais, fornecendo de forma consistente resultados de estimativa de altura da base das copas.

Galvêncio e Popescu (2016) desenvolveram uma metodologia para medição de altura e diâmetro da copa em florestas de mangue no litoral da região Nordeste do Brasil, com dados LiDAR. As medidas do diâmetro da copa foram calculadas a partir de valores medidos em duas direções perpendiculares na parte superior de cada árvore. E os resultados demonstraram que dados laser podem ser usados para estimativa de altura e diâmetro médio das copas das árvores de mangue, bem como estimativas de parâmetros biofísicos em outras florestas.

Diante do exposto, este capítulo tem como objetivo determinar a variação espacial da altura de espécies arbóreas em vegetação de semiárido com a utilização de dados LiDAR.

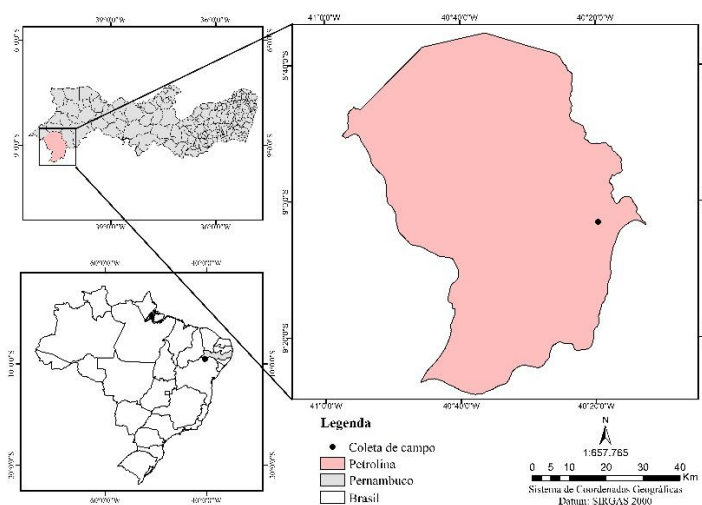
2.2 Material e métodos

2.2.1 Caracterização da área de estudo

As áreas selecionadas para o estudo estão localizadas no município de Petrolina, extremo oeste do estado de Pernambuco (Figura 1), fazendo divisa com o município de Juazeiro, na Bahia. Este município apresenta uma área de 4.562 km², com uma população total de 293.962 habitantes, segundo último censo demográfico realizado pelo IBGE (2010). Segundo Calixto Júnior e Drumond (2011a) a área faz parte da mesorregião do São Francisco e possui classificação climática segundo Koppen do tipo BSw^h, definido como semiárido quente, com pluviometria média anual em torno de 500 mm e temperatura média de 26°C. A vegetação é do tipo hiperxerofila, as chuvas de verão ocorrem de novembro a abril, com o mês mais chuvoso sendo março e os mais secos julho e agosto. Predomina na área o solo do tipo argissolo vermelho-amarelo.

De modo geral, o município tem suas bases econômicas atreladas ao setor do agronegócio, com a maior parte da produção destinada ao mercado externo, sendo este setor econômico o maior responsável pela composição do PIB da região.

Figura 1 - Localização geográfica do município de Petrolina – PE.



Fonte: Elaborada pela autora.

2.2.2 Dados de campo

As coletas de dados em campo foram realizadas em uma área de caatinga preservada localizada na Embrapa Semiárido no município de Petrolina, estado de Pernambuco. A área corresponde a um Sítio de Pesquisas do Projeto Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que busca a geração de informações sobre o funcionamento dos ecossistemas brasileiros. O sítio PELD do semiárido possui uma dimensão total de 250.000 m².

Para medição das variáveis da vegetação foram demarcadas cinco parcelas aleatoriamente ao longo de uma trilha existente na área do sítio PELD, que permite adentrar na

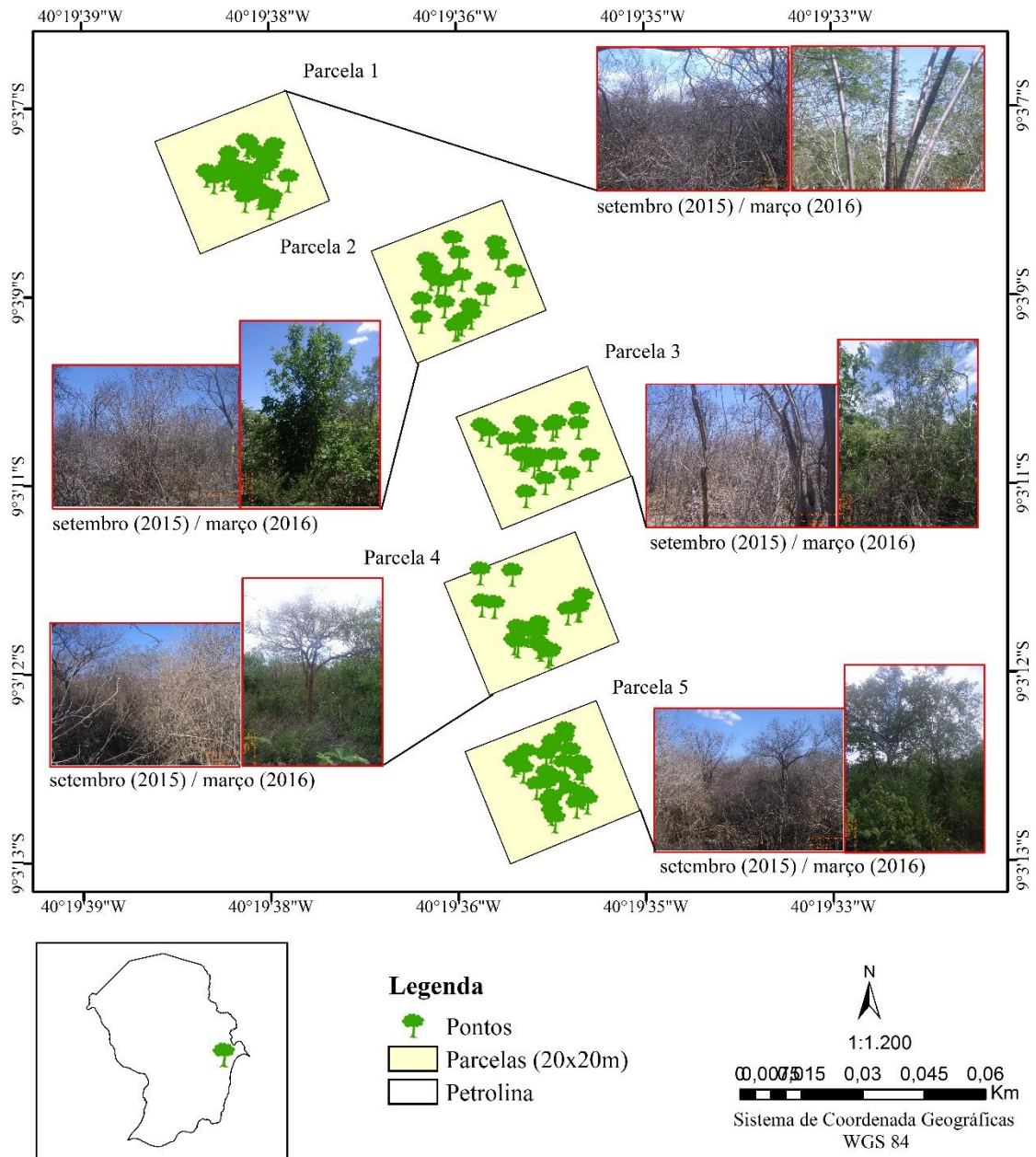
vegetação adensada. As parcelas demarcadas com 20x20 m cada (Figura 2), tiveram suas dimensões estabelecidas com base na proposta da Rede de Manejo Florestal da Caatinga (2005).

Foram realizadas duas coletas de dados em campo, em setembro de 2015 e em março de 2016. As coletas foram efetuadas no período seco e chuvoso para que a amostragem representasse as variações climáticas e o modelo que seria desenvolvido pudesse ser utilizado em qualquer época do ano. Cada coleta teve uma duração de três dias e colaboração de uma equipe de oito pesquisadores do Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (SERGEO) da Universidade Federal de Pernambuco e Embrapa Semiárido.

Nas parcelas foram obtidas medidas de altura total, da base até a copa, de árvores aleatórias maiores que 1 m, com a utilização de hipsômetro (*OPTI-Logic*), indicado para inventário florestal, pertencente ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (SERGEO) do Departamento de Ciências Geográficas (DCG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Para medição com esse equipamento é necessário que o observador ative o laser, primeiramente no topo da árvore e posteriormente em sua base, sem que haja deslocamento de sua posição. Essa metodologia requer um certo tempo nas medições em campo, tendo em vista os fatores que podem atrapalhar, tais como o vento, a luz solar e o adensamento da vegetação. Caso ocorram erros durante a medição, o equipamento acusará este fato.

Durante a coleta de dados, que ocorreu no mês de março de 2016, a vegetação encontrava-se recuperada, com sua folhagem vigorosa em decorrência da estação chuvosa na região, o que facilitou a identificação das espécies vegetais no momento da obtenção de suas medidas. Esse tipo de informação não foi possível ser coletado durante a medição que ocorreu na época da estação seca, quando as árvores estavam sem a folhagem, dificultando sua identificação.

Figura 2 - Espacialização dos indivíduos medidos em campo.



Fonte: Elaborada pela autora.

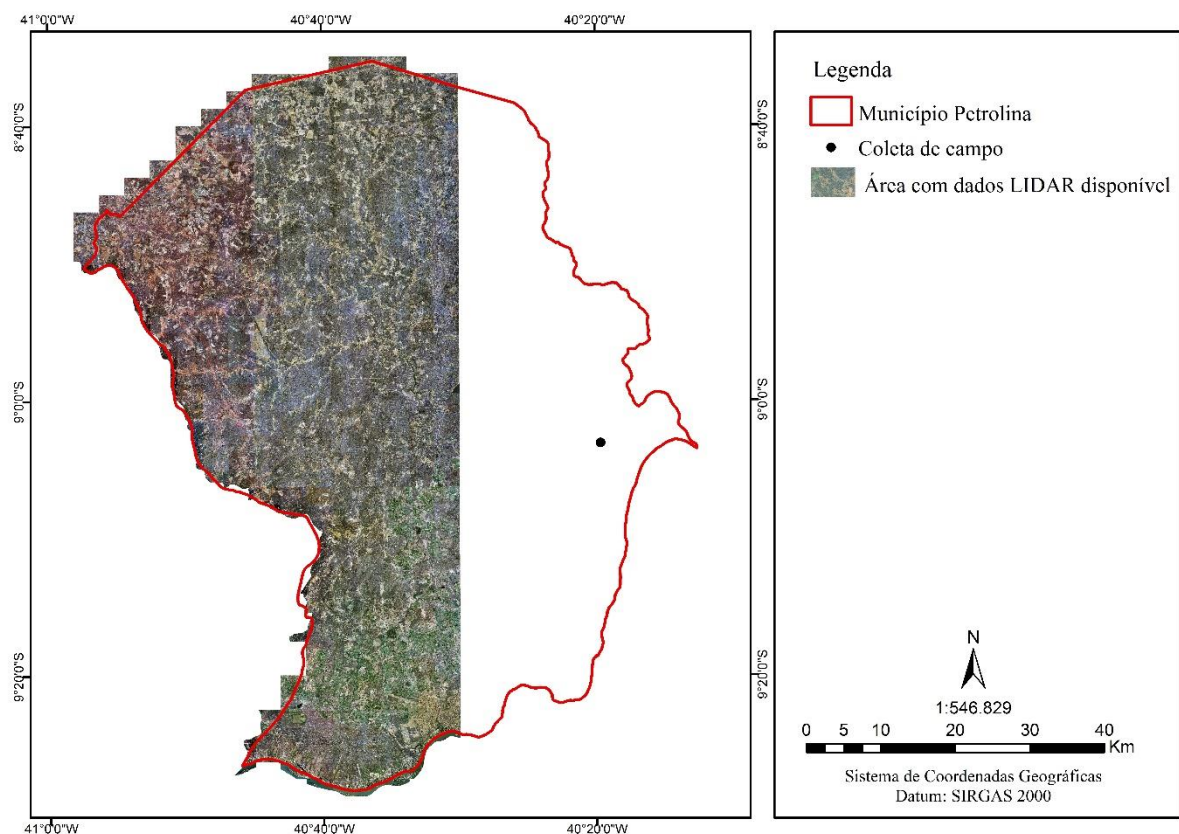
2.2.3 Aquisição do dados LiDAR e escolha das áreas para análise

Os dados LiDAR foram obtidos gratuitamente na plataforma do projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) (PERNAMBUCO, 2016). Para este estudo foram utilizados os produtos

do modelo digital de elevação (MDE) e as ortoimagens geradas na escala 1:5000, com resolução espacial de 50 cm. Os dados do referido projeto foram obtidos com a utilização de oito aviões equipados com emissores de raios laser e câmeras digitais de alta definição, com o objetivo de realizar o mapeamento 3D para todo o estado de Pernambuco, o mesmo teve início em janeiro de 2014 e terminou no fim de 2015, porém, apenas cerca de 35% dos produtos gerados foram disponibilizados na plataforma até fevereiro de 2017.

Para o município de Petrolina, os dados disponibilizados recobrem apenas a porção oeste (Figura 3), impossibilitando a utilização dos produtos para comparação com os dados provenientes da coleta em campo.

Figura 3 - Área com dados LiDAR disponíveis para o município de Petrolina – PE.



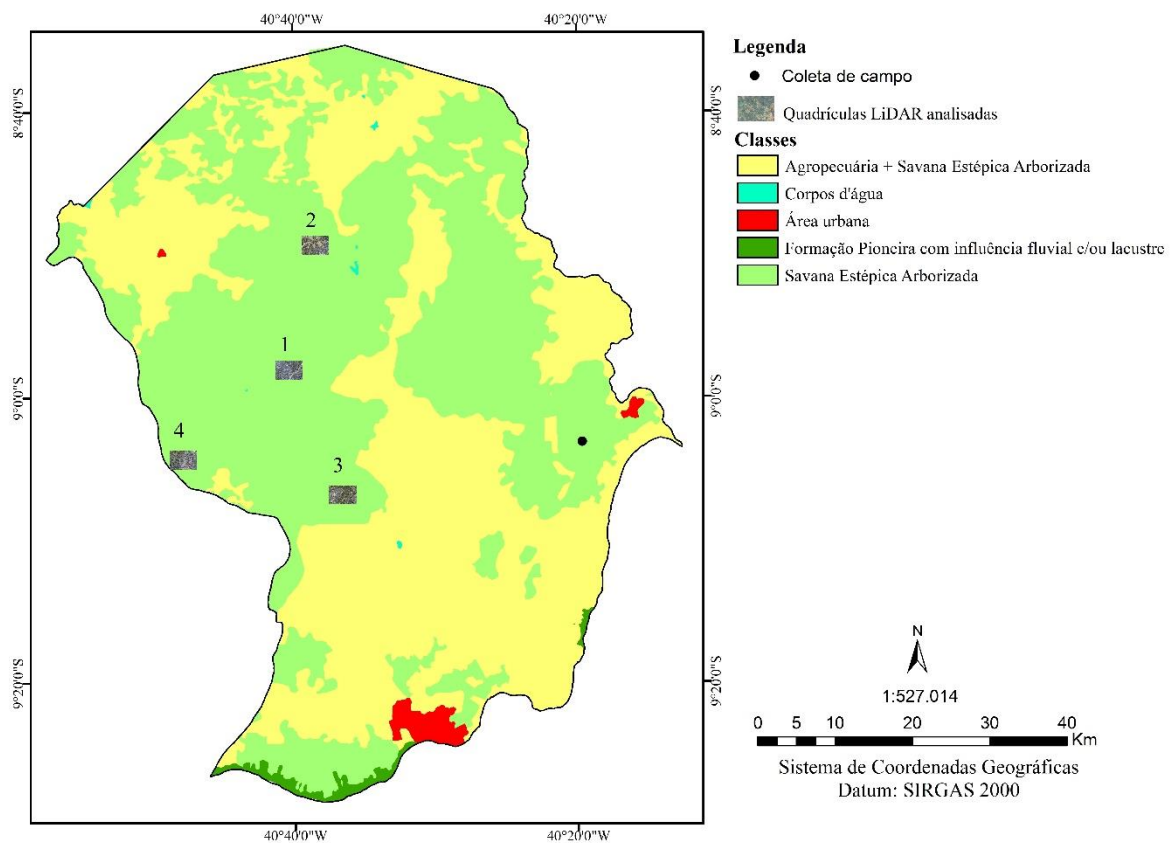
Fonte: Elaborada pela autora.

A escolha da área a ser analisada levou em consideração condições ambientais semelhantes, dessa forma, adquiriu-se gratuitamente uma carta com a classificação da vegetação do bioma Caatinga junto ao banco de dados do projeto de conservação e utilização sustentável da diversidade biológica brasileira (PROBIO), que utilizou técnicas de Sensoriamento Remoto com imagens do satélite Landsat para seu desenvolvimento. De posse

desses dados, foi realizado um recorte para o município de Petrolina e confecção do layout (Figura 4) no *software* ArcGis 9.3, licenciado do laboratório SERGEO.

Através desse procedimento foi identificado que a área do Sítio PELD na Embrapa Semiárido, possui vegetação classificada como Savana Estépica Arborizada. Através dessa informação e do auxílio das ortoimagens de alta resolução do PE3D, foram escolhidas 4 quadrículas de dados LiDAR em áreas que também compreendem a vegetação classificada como Savana Estépica arborizada, para realização da comparação entre os dados.

Figura 4 – Classificação da vegetação para o município de Petrolina – PE, localização das quadrículas *Light Detection And Ranging* - LiDAR utilizadas na análise e área de coleta de dados em campo.



Fonte: Elaborada pela autora.

2.2.4 Processamento dos dados LiDAR

Após a aquisição dos dados LiDAR em formato *txt*, os mesmos foram importados no programa *QT Modeler* (*Quick Terrain Modeler* v. 8.0.2), licenciado pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento no Departamento de Ciências Geográficas da UFPE. Este *software* é geralmente utilizado para visualização e processamento de dados em 3D.

Foi calculada a altura das árvores com a utilização da ferramenta *Above Ground Level* (AGL), do *menu Analyst* disponível no programa, que permite calcular alturas acima do nível do solo. Também foram inseridos diferentes valores de amostragem no campo *Grid Sampling* (1 m, 2 m e 3 m), essa variação na amostragem do *grid* foi realizada para que os resultados gerados do *Canopy Height Model* (CHM), pudessem avaliados quanto a sua precisão. Após a criação do CHM, o mesmo foi exportado no formato de arquivo *las*, muito utilizado quando se trata de informações de nuvem de pontos tridimensional (3D). A criação do arquivo em formato *las* possibilita que os dados sejam exportados em *tif*, permitindo que seja realizado no software ENVI 5.0, o procedimento de exclusão de possíveis valores negativos contidos no CHM.

O modelo CHM foi importado no software *TreeVaW v1.1*, utilizado para medir árvores individualmente com dados LiDAR. De acordo com Zhao, Popescu e Nelson (2009), o programa identifica as árvores através de uma filtragem implementada por uma janela variável que é dimensionada de acordo com a altura das árvores e o diâmetro da copa, derivada de um modelo de regressão (Equação 1), entendendo-se que uma árvore mais alta possui uma copa mais ampla. Os parâmetros utilizados para ajuste da equação do modelo no software *TreeVaw* (Equação 1), foram propostos por estudo desenvolvido por Galvinctio e Popescu (2016) para a identificação de altura das árvores. Após essa etapa, foi gerada uma lista com a localização das árvores, altura e largura das copas em formato *txt*, o qual foi importado no software *ArcMap* de Sistema de Informação Geográfica (SIG), e transformado em arquivo vetorial de *shape* de pontos para espacialização dos dados.

$$CW = hgt^3 + 0,0213 \times hgt^2 + 0,0019 \times hgt + 2,19130 \quad (1)$$

Onde:

hgt = altura;

0,0213 = constante B_1 ;

0,0019 = constante B_2 ;

2,19130 = constante B_3 .

2.2.5 Recorte para os dados LiDAR

Foram processadas quatro quadrículas LiDAR, cada uma correspondendo a uma área de, aproximadamente, 858 ha. Dentre essas quadrículas foi realizado o recorte da que

apresentou maior adensamento da vegetação, identificado através de imagens de alta resolução dos dados LiDAR, buscando condições semelhantes a área de coleta em campo.

O recorte foi realizado no *software ArcGis 9.3*, e efetuado para uma área de 2000 m², devido ao fato das cinco parcelas demarcadas no sítio PELD não possuírem dados LiDAR disponíveis e corresponderem a essa dimensão. Esse procedimento objetivou a comparação dos resultados de identificação das alturas obtidas após a delimitação de cada valor mínimo de altura inserido no campo *grid* durante o processamento dos dados. O recorte também foi importante para comparação dos resultados de indivíduos identificados com alturas maiores que 1 m obtidos na estimativa e os que foram medidos em campo.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Modelo Digital de Elevação (MDE) e Modelo de Altura das copas (CHM)

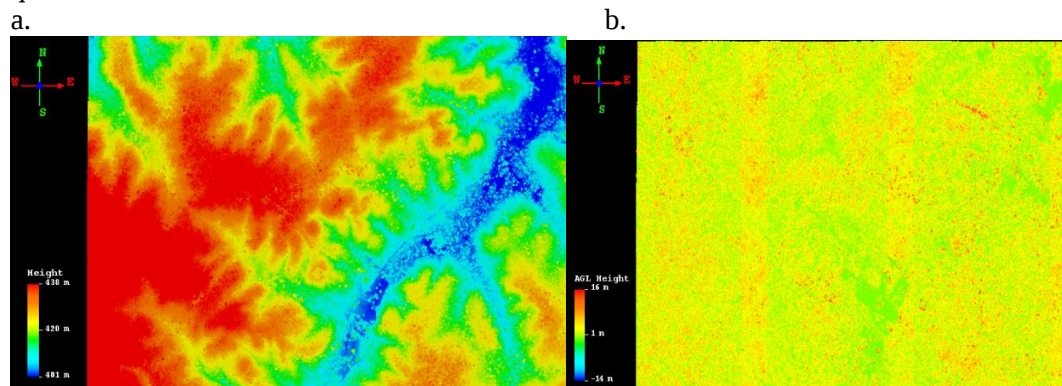
Os dados brutos, representados nas Figuras 5-a, 6-a, 7-a e 8-a, são referentes ao MDE e permitem analisar a variação da altura total das áreas, compreendendo a altura do terreno e da vegetação. No geral, o MDE variou de 339 a 469 m nas quatro áreas analisadas, onde as áreas mais elevadas estão representadas em vermelho. As alturas das árvores extraídas após o cálculo do CHM estão representadas nas Figuras 5-b, 6-b, 7-b e 8-b. No geral, as alturas se mostraram semelhantes, atingindo o valor máximo de, aproximadamente, 18 m.

O MDE da quadrícula 1 (Figura 5-a) revelou uma variação de 401 a 438 m no terreno, as áreas em vermelho representam as maiores altitudes, e em azul, as mais baixas. A altura máxima das árvores (Figura 5-b) encontrada para a área foi de, aproximadamente, 16 m, representados em laranja na imagem. Nota-se que árvores de porte mais elevado encontram-se bem distribuídas por toda a área da imagem.

Na Figura 6-a e 6-b estão representados o modelo digital de elevação e o modelo de altura das copas, respectivamente. Os valores de altitude, somados à altura da vegetação variaram de 394 a 441 m. A área está localizada mais ao norte do município de Petrolina. Após o processamento dos dados para obtenção dos valores de altura da vegetação, foi identificada uma altura máxima também de aproximadamente 18 m, assim como na quadrícula 1 (Figura 5), porém essa ocorrência se mostrou bem menor na espacialização dos dados para essa quadrícula do que na anterior, havendo a predominância de árvores com altura mediana de 5 m. A atividade agrícola na área é intensa. As manchas em tons de verde na Figura 6-b

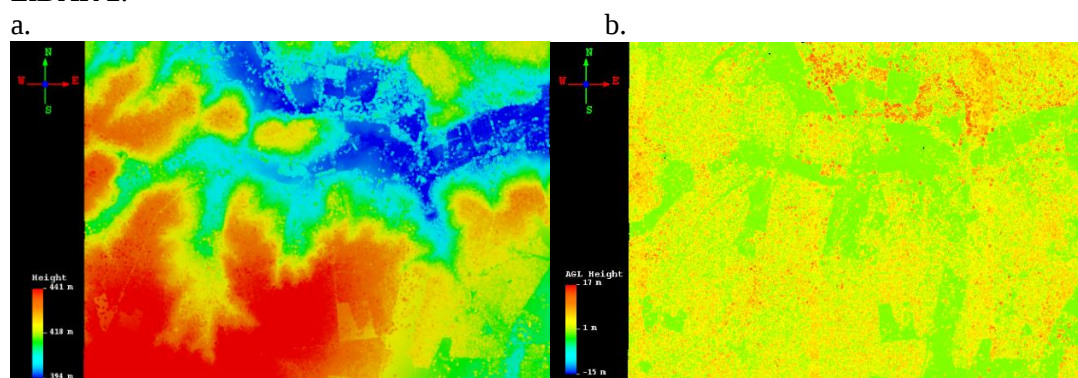
representam o desmatamento da vegetação nativa para a inserção de práticas de agricultura de sequeiro, muito comum nesta região.

Figura 5 – Variação do Modelo Digital de Elevação (a) e CHM – *Canopy Height Model* (b), para quadrícula LiDAR 1



Fonte: Elaborada pela autora.

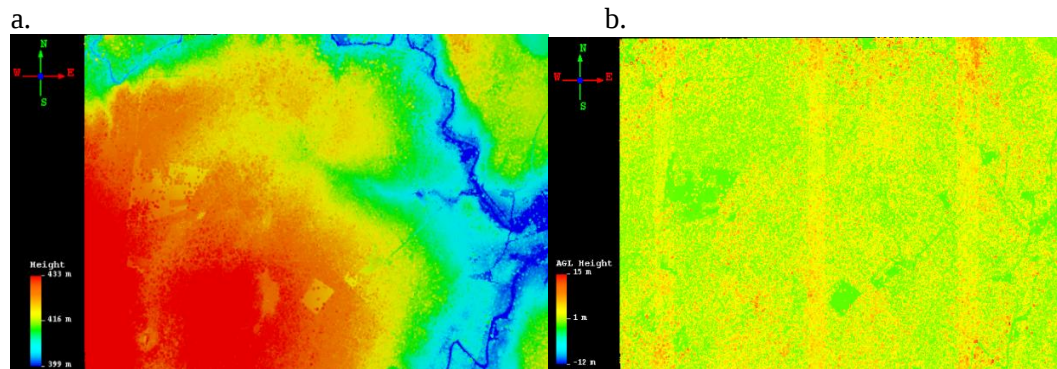
Figura 6 – Variação do Modelo Digital de Elevação CHM – *Canopy Height Model*, para quadrícula LiDAR 2.



Fonte: Elaborada pela autora.

A quadrícula 3 que se encontra mais ao sul, dentre as áreas analisadas, apresentou os valores de MDE (Figura 7-a) mais baixos encontrados nas áreas de estudo, variando de 399 a 433 m. Na Figura 7-b é possível observar as alturas extraídas após o cálculo do CHM, que revelaram a predominância de árvores de baixo porte, ente 1 e 5 m, com valores mais elevados e pouco representativos na área, correspondente a poucos pontos em vermelho encontrados na imagem, seu valor máximo atinge aproximadamente 15 m. Esta quadrícula, assim como a de número 2 (Figura 6), também apresenta elevado grau de degradação da vegetação. As áreas em verde representam clareiras formadas a partir da introdução de atividades agrícolas e/ou agropecuárias, identificadas através das ortoimagens de alta resolução do Projeto Pernambuco Tridimensional.

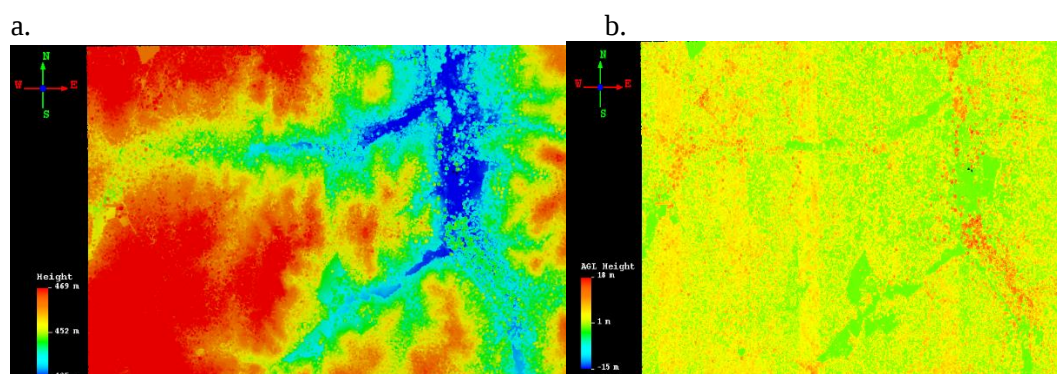
Figura 7 – Variação do Modelo Digital de Elevação CHM – *Canopy Height Model*, para quadrícula LiDAR 3.



Fonte: Elaborada pela autora.

A Figura 8 compreende a quadrícula 4 analisada neste estudo, localizada no extremo oeste do município de Petrolina, próximo à divisa com o Estado da Bahia. A área apresentou os valores de MDE (Figura 8-a) mais elevados dentre as quatro quadrículas analisadas, variando entre 435 e 469 m. Na Figura 8-b está representado o modelo de altura das copas, que revelou a alta presença de vegetação com altura ente 3 e 9 m, próximo, principalmente à divisa do Estado, onde os tons em amarelo na parte oeste da imagem são mais constantes. As árvores com altura mais elevada, variando de 16 à 18 m, aproximadamente, encontram-se bem distribuídas. Também existe a presença de áreas que foram desmatadas, porém em menor quantidade, quando comparada às outras quadrículas LiDAR deste estudo. Essas áreas estão representadas pelos tons de verde na imagem do CHM (Figura 8-b).

Figura 8 – Variação do Modelo Digital de Elevação CHM – *Canopy Height Model*, para quadrícula LiDAR 4.



Fonte: Elaborada pela autora.

Os resultados de altura encontrados nessas quatro quadrículas se aproximam aos obtidos por Rodal, Martins e Sampaio (2008), em um levantamento quantitativo de plantas lenhosas em

trechos de vegetação de caatinga do Estado de Pernambuco, onde mediram árvores de até 20 m de altura.

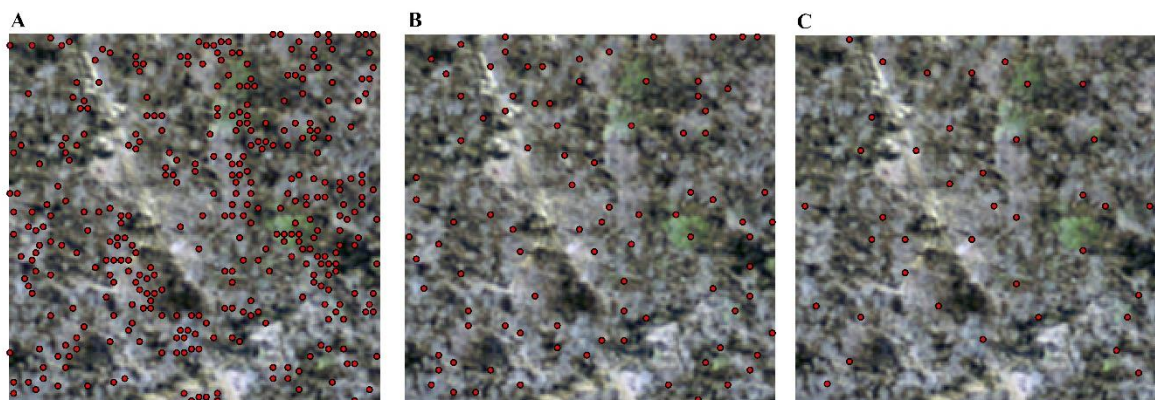
2.3.2 Comparação entre os dados de campo e as estimativas

O recorte dos resultados da identificação de alturas individuais para as árvores da área, em diferentes amostragens de *grids*, que delimitaram a altura mínima a ser mensurada em 1 m, 2 m e 3 m, gerando três produtos diferentes, está representado na Figura 9. Os resultados revelaram uma diminuição significativa na quantidade total de indivíduos à medida que era aumentado 1 m no valor de altura mínima, estabelecido para inclusão das árvores na quantificação.

Foi determinado um total de 353 árvores com altura superior a 1m, 93 maiores que 2 m e 40 com alturas acima de 3m (Figura 9 A, B e C, respectivamente) para a parcela de 2000 m².

Os resultados de altura observados em campo e obtidos através de estimativa com dados LiDAR se assemelham, os mesmos estão descritos na Tabela 1. O número de indivíduos contados em campo nas cinco parcelas, que representam 2000 m², totalizaram 359, enquanto o estimado pelo LiDAR foi de 353 indivíduos. Isso representa 98% de acerto. A altura média obtida em campo foi de 3,70 m e a estimada com LiDAR foi de 3,86 m, com um desvio padrão de 0,08, ou seja, 96% de acerto, o que evidencia a eficácia no uso dos dados LiDAR.

Figura 9 - Variação espacial das árvores, (A) usando grid de 1m, (B) usando grid de 2m, (C) usando grid de 3m.



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 1 - Comparação entre resultados de altura obtidos em campo e estimados com dados LiDAR.

Variável	Número de indivíduos	Altura (m)			Desvio Padrão*
		Mínima	Máxima	Média	
Observada	359	1,80	7,80	3,70	0,08
Estimada	353	1,45	10,66	3,86	

*Obtido a partir da média da altura observada e estimada.

2.3.3 Altura medida em campo

Nas cinco parcelas delimitadas em campo foram medidas 243 árvores, as alturas mensuradas foram subdivididas em classes de alturas com intervalo de 3 m, com exceção da última classe, que atinge o valor máximo de altura medido em campo.

As alturas variaram de baixo a médio porte, variando de 1 a 7,50 m. A maior concentração de indivíduos ocorreu na segunda classe, que vai de 3,1 a 6 m. Apenas as parcelas dois e três apresentaram indivíduos na classe que varia de 6,01 a 7,50m.

Tabela 2 – Distribuição dos indivíduos em campo por parcela e classe de altura.

Quantidade de indivíduos por parcela						
Classes de altura (m)	Parcelas					Total
	1	2	3	4	5	
1,00 – 3,00	16	11	10	12	9	58
3,01 – 6,00	45	20	30	31	51	177
6,01- 7,50	0	5	3	0	0	8
						243

Fonte: Dados da pesquisa.

2.3.4 Altura estimada com dados LiDAR

As quatro quadrículas LiDAR processadas para análise nesse estudo equivalem a uma área de, aproximadamente, 8 mil km². Foram identificados 876.757 árvores, com alturas variando de no mínimo 1 m, que foi a altura estabelecida durante o processamento e altura máxima por quadrícula variando de 14.89 a 17.69 m (Tabela 3).

A quadrícula 1 apresentou a maior concentração de indivíduos, com 274.554 árvores, seguida da quadrícula de número 4, com 253.329 indivíduos. As quadrículas 2 e 3 se mostraram as mais degradadas por atividades antrópicas, principalmente a de número 3 com 84.921 valor mais baixo encontrado, a quadrícula se encontra mais ao sul do município onde as atividades de agropecuária e agricultura se intensificam devido à proximidade com o Rio São Francisco e

a área urbanizada do município. As alturas totais das árvores não ultrapassaram 17.67 m a quadrícula 3 apresentou a altura máxima de 14.89, menor em relação as outras.

Tabela 3 – Total de Indivíduos identificados nas quadrículas e altura máxima encontrada.

Quadrículas	Total de Indivíduos	Altura Mínima (m)	Altura Máxima (m)
1	274.554	1.00	15.92
2	253.329	1.00	17.65
3	84.921	1.00	14.89
4	263.953	1.00	17.69

Fonte: Dados da pesquisa.

Quando subdivididas as alturas totais em classes, nota-se que, no geral, os indivíduos se concentram nas classes mais baixas entre 1 e 6 m, comportamento característico da Savana Estépica Arborizada. São poucos os indivíduos pertencentes às últimas classes que apresentam porte mais elevado entre 12,01 e 17,69 m, as ocorrências maiores foram nas quadrículas 2, situada mais ao norte do município, e a 4 a oeste, próximo à divisa com o estado da Bahia. A quadrícula 3 não apresentou nenhum indivíduo na última classe de altura, que vai de 15.01 à 17.69, e os menores valores nas classes entre 9,01 e 12,00 m, o que pode ser resultado de uma degradação seletiva com maior extração da madeira para fins lucrativos nessa área.

Tabela 4 –Indivíduos identificados nas quadrículas subdivididos por classe de altura.

Classes de altura (m)	Quantidade de indivíduos			
	1	2	3	4
1.00 -3.00	131.134	98.990	42.676	93.674
3.01 - 6.00	134.380	133.663	82.322	146.138
6.01 - 9.00	8.432	16.292	2.459	20.546
9.01 - 12.00	572	2.533	129	3.482
12.01 - 15.00	33	168	12	393
15.01 - 17.69	3	2	0	11

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 4, a quantidade de indivíduos por quadrículas está expressa em porcentagem, reforçando a análise estabelecida até aqui. Mais de 91% dos indivíduos de cada quadrícula pertencem às duas primeiras classes de altura, compreendendo os intervalos de 1 a 6 m de altura. Esse resultado é muito semelhante ao encontrado por Rodal et al. (1998), para uma amostragem de 400 indivíduos realizada no município de Buíque – PE, onde identificaram alturas médias e máximas da vegetação de 2,3 e 7, respectivamente, e com maiores concentrações de altura entre as classes de 1 a 2 m.

Ao desenvolver estudo para estimativa de biomassa vegetal também em área experimental de caatinga na Embrapa Semiárido, Lima Júnior et al. (2014) identificaram alturas médias das árvores variando de 3,4 a 5,4 m a partir de dados coletados em 20 parcelas de 200 m².

Tabela 5 – Porcentagem dos indivíduos identificados nas quadrículas subdivididos por classe de altura.

Classes de altura (m)	Quantidade de indivíduos (%)			
	1	2	3	4
1.00 - 3.00	47.8	39.1	50.3	35.5
3.01 - 6.00	48.9	52.8	46.7	55.4
6.01 - 9.00	3.1	6.4	2.9	7.8
9.01 - 12.00	0.2	1.0	0.2	1.3
12.01 - 15.00	0.0	0.1	0.0	0.1
15.01 - 17.69	0.0	0.0	0.0	0.0

Fonte: Dados da pesquisa.

2.4 Conclusões

As alturas obtidas em campo e por meio do LiDAR apresentaram maior concentração de indivíduos variando de 1 a 6 m, representando mais de 70% das áreas analisadas.

A identificação da altura individual obtidas com o LiDAR mostram a eficiência da utilização da tecnologia na obtenção de altura total das árvores em áreas de vegetação de caatinga. O método pode ser aplicado para vastas extensões do território para obter uma maior gama de informações com baixo custo em tempo reduzido.

Os coeficientes de ajuste para o modelo *TreeVaw*, desenvolvidos por Galvncio e Popescu (2016), permitiram ótimas respostas para a medição de altura individual em árvores da caatinga.

3 ESTIMATIVA DE DIÂMETRO À ALTURA DO PEITO EM FLORESTA DE CAATINGA COM A UTILIZAÇÃO DE MODELOS ALOMÉTRICOS

3.1 Introdução

O conhecimento sobre variáveis da vegetação que possibilitem estimar produção ou recuperação de seu crescimento são de extrema necessidade. A demanda por esse tipo de informação é crescente, tendo em vista o desenvolvimento de métodos alternativos de manejo das vegetações, frente às frequentes intervenções antrópicas e mudanças no uso da terra. Deste modo, é de extrema importância o estabelecimento de critérios para o manejo de espécies nativas em florestas naturais e plantadas (MATTOS et al., 2013).

As plantas acumulam biomassa para sua sustentação à medida que crescem, isso ocorre devido às pressões ambientais a que são submetidas. Para que a acumulação de biomassa continue ocorrendo, é necessário que a planta desempenhe sua função fotossintética de modo adequado. Conhecer a variação desses mecanismos na vegetação permite entender suas estratégias adaptativas. O estudo da relação entre tamanhos e formas em plantas é denominado alometria (LIBONI et al., 2010).

A alometria é o estudo das variações das formas e processos dos organismos. As equações alométricas são modelos matemáticos originárias de modelos de regressão (ANDRADE; HIGUCHI, 2009). Da mesma forma que é possível obter medidas de biomassa e carbono da vegetação através de modelagem, outras relações dendrométricas também podem ser estimadas, como altura, diâmetro e peso. As equações de regressão se resumem a obter uma expressão quantitativa de dependência entre uma variável que seja de difícil obtenção e uma ou mais variáveis independentes, que sejam mais fáceis de serem obtidas. Essas estimativas realizadas através de relações matemáticas permitem analisar diversas questões florestais em que são necessárias variáveis da vegetação para seu entendimento, como crescimento e produção de uma floresta (RATCHUNE et al., 2016).

A realização de medidas diretas de biomassa florestal em campo é um método destrutivo, por essa razão é preferível a utilização de modelos alométricos capazes de realizar esta estimativa. Os modelos permitem a obtenção de valores de biomassa total em árvores isoladas e têm como base para esses resultados variáveis conhecidas previamente e medidas sem a necessidade de destruição da vegetação, como diâmetro à altura do peito ou altura das árvores (MUUKKONEN; HEISKANEN, 2005).

O diâmetro à altura do peito (DAP) é uma das variáveis mais importantes a ser medida em florestas, quando se pretende obter informações estratégicas sobre a vegetação. Geralmente seu valor é associado a variáveis como volume, área basal e biomassa. Esta variável foi a primeira independente a ser testada em um modelo de regressão e processos de ajustamento, muitas vezes sendo a única a compor um modelo. Muitos autores no início do século XX realizaram medições de DAP em diferentes alturas, comprometendo a comparação de resultados obtidos por diferentes pesquisadores. Por essa razão, foi acordado internacionalmente que as medidas de diâmetro à altura do peito seriam tomadas a 1,3 m do solo (MORAIS et al., 2014).

Embora seja uma variável considerada de fácil medição em campo, quando comparada à altura, por exemplo, existe a dificuldade de sua obtenção em florestas nativas geralmente adensadas e em algumas com árvores retorcidas, como é o caso das florestas decíduas secas. Diferentemente de florestas plantadas, onde se torna mais acessível a aquisição desses dados, a medição de diâmetro à altura do peito em vegetação de caatinga em larga escala é um procedimento extremamente difícil. Isto evidencia a importância de novas metodologias para a obtenção desse parâmetro de forma precisa e aplicado em vastas extensões de terra.

No entanto, para a calibração e ajuste das equações ainda é necessária a inserção de parâmetros adquiridos em campo, de forma direta. É preciso sempre avaliar as melhores equações através de indicadores de qualidade, como coeficientes de determinação (R^2) e ou erro-padrão da estimativa (Sy,x). É importante que para cada tipo florestal e para cada sítio seja criado um modelo matemático que represente, da melhor maneira, as características locais (BALBINOT et al., 2009).

O DAP pode ser estimado em função da altura total das árvores, através de modelos (OLIVEIRA et al., 2014). Nesse sentido, o uso da tecnologia a laser aerotransportado, ou Light Detection And Ranging (LiDAR), vem se mostrando uma técnica promissora do sensoriamento remoto que permite a estimativa de características biofísicas das florestas, entre elas a altura total das árvores. Os dados LiDAR combinam elevação de superfície, coordenadas planimétricas precisas e algoritmos de processamento, podendo identificar árvores isoladas ou grupos de árvores para extrair várias medidas em sua representação tridimensional (POPESCU; WYNNE; NELSON, 2002).

Oliveira et al. (2014) obtiveram resultados satisfatórios ao estimar o diâmetro à altura do peito com dados de altura provenientes do LiDAR e, posteriormente, determinaram o volume de madeira em uma área com plantação de *Eucalyptus* sp. no sul da Bahia. Para tanto foram realizados ajustes em modelos tradicionais de regressão com dados de inventário florestal

para estimativa de DAP a partir da altura das árvores obtida com dados LiDAR. A escolha da equação que melhor se ajustou foi realizada com base no coeficiente de determinação R^2 , erro padrão da estimativa e gráficos de resíduos.

Ao desenvolver um estudo para a estimativa de biomassa acima do solo em *Pinus taeda* L., no sudeste dos Estados Unidos, Popescu (2007) afirmou que, embora a variável DAP não seja uma dimensão diretamente visível nos resultados provenientes de processamento dos dados LiDAR, outras variáveis derivadas desses resultados, como a altura, correlaciona-se bem com o DAP. No estudo foi realizada a estimativa de DAP utilizando medidas de árvores individuais derivadas do LiDAR e modelo de regressão linear. Os resultados encontrados revelaram um coeficiente de determinação de 0,87 com os dados observados em campo, evidenciando que dados do laser podem ser usados para estimar, com precisão, parâmetros biofísicos de árvores individuais, entre eles o diâmetro à altura do peito.

Diante do exposto, esse estudo tem por objetivo desenvolver um modelo para estimativa de DAP, calibrado para a floresta caatinga.

3.2 Material e métodos

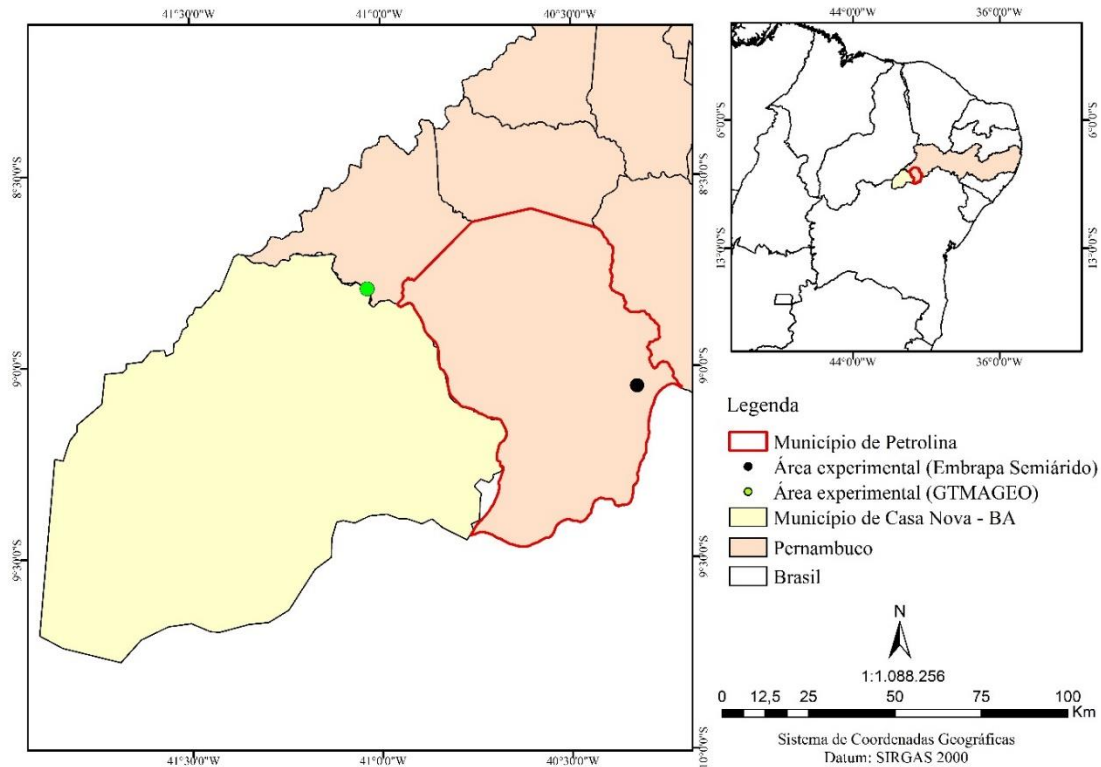
3.2.1 Localização e caracterização da área de estudo

As coletas de dados em campo foram realizadas em duas áreas de caatinga (Figura 1). A primeira encontra-se totalmente preservada, é um Sítio de Pesquisas do Projeto Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que busca a geração de informações sobre o funcionamento dos ecossistemas brasileiros e está localizado na Embrapa Semiárido no município de Petrolina – PE. As coletas no local foram realizadas em setembro de 2015 e março de 2016. A segunda área não é totalmente preservada e encontra-se no município de Casa Nova – BA, uma estação experimental do Grupo de Trabalho em Monitoramento Ambiental Geotecnologia e Ensino (GTMAGEO) pertencente à Universidade de Pernambuco – Campus Petrolina, onde as medidas de DAP foram coletadas em novembro de 2015.

Ambas as áreas estão inseridas no semiárido nordestino. O clima predominante na região é o tropical semiárido, conforme classificação de Köppen, com pluviometria média anual em torno de 500 mm e temperatura média de 26° C. De acordo com Lucena, Gomes Filho e Servain (2011), as chuvas são bastante escassas e concentram-se entre os meses de dezembro a abril, sob influência de sistemas atmosféricos dinâmicos, entre os quais destaca-se a Zona de

Convergência Intertropical (ZCIT), a penetração de sistemas oriundos de latitudes médias austrais, Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Instabilidades associadas às Frentes Frias e Oscilação de Madden-Julian.

Figura 10 – Localização geográfica das áreas experimentais (Embrapa Semiárido e GTMAGEO).



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.2 Coleta de dados em campo

Para a realização das medições de DAP foram demarcadas parcelas de 20x20 m, como recomendado pela Rede de Manejo Florestal da Caatinga (2005). Cinco parcelas foram estabelecidas na área do Sítio de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) (Figura 2) e uma na estação experimental do GTMAGEO (Figura 3). Foram realizadas medições de altura das árvores e circunferência à altura do peito (CAP), a 1,30 m do chão de indivíduos aleatórios com fator CAP de inclusão acima de 9,5 cm, que corresponde a um diâmetro de 3 cm, como proposto em metodologia de Lima Júnior et al. (2014), em estudo desenvolvido em área de vegetação de caatinga. O equipamento utilizado para medição de altura foi um hipsômetro (*OPTI-Logic*), pertencente ao Laboratório de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento (SERGEO) do Departamento de Ciências Geográficas (DCG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Para a medição de circunferência à altura do peito foi utilizada uma fita métrica.

Figura 11 – Área de vegetação de caatinga no Sítio de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração (PELD) na Embrapa Semiárido em Petrolina – PE (Foto de 22/09/2015).



Fonte: A autora.

Figura 12 – Área de vegetação de caatinga na estação experimental do Grupo de trabalho em monitoramento ambiental geotecnologia e ensino – GTMAGEO, Casa Nova – BA (Foto de 08/11/2015).



Fonte: A autora.

3.2.3 Obtenção do diâmetro à altura do peito (DAP)

A relação matemática representada na Equação 1 foi aplicada para obtenção do diâmetro à altura do peito (DAP) das árvores medidas nas 6 parcelas em campo, a partir da circunferência à altura do peito (CAP) e π , que é a proporção numérica originada da relação entre as grandezas do perímetro de uma circunferência e o seu diâmetro.

$$DAP = \left(\frac{CAP}{\pi} \right) \quad (1)$$

Onde,

DAP = diâmetro à altura do peito;

CAP = circunferência à altura do peito;

$\pi = 3,1415$.

3.2.4 Desenvolvimento de modelo para estimativa de diâmetro à altura do peito (DAP) calibrado para floresta de Caatinga

Para desenvolvimento do modelo de estimativa de diâmetro à altura do peito foram utilizados os dados de campo do Sítio PELD, os quais foram submetidos a análise estatística usando o programa Statistical Product and Service Solutions (SPSS) e testados os seguintes modelos de regressão linear: Linear (Equação 2), Logarítmico (Equação 3), Inverso (Equação 4), Quadrático (Equação 5), Cúbico (Equação 6), Composto (Equação 7), Potência (Equação 8), Sigmoidal (Equação 9), Crescimento (Equação 10) e Exponencial (Equação 11), conforme metodologia de Galvêncio et al. (2013).

$$Y = b0 + (b1 \times t) \quad (2)$$

$$Y = b0 + (b1 \times \ln t) \quad (3)$$

$$Y = b0 + \frac{B1}{t} \quad (4)$$

$$Y = b0 + B1t + B2t^2 \quad (5)$$

$$Y = b0 + b1t + b2t^2 + b3t^3 \quad (6)$$

$$Y = b0 b1^t \text{ ou } \ln Y = \ln b0 + (t \times \ln b1) \quad (7)$$

$$Y = b0t^{b1} \text{ ou } \ln Y = \ln b0 + (b1 \ln t) \quad (8)$$

$$Y = e^{b_0 + \frac{b_1}{t}} \text{ ou } \ln Y = b_0 + \frac{b_1}{t} \quad (9)$$

$$Y = e^{b_0 + b_1 t} \text{ ou } \ln Y = b_0 + b_1 t \quad (10)$$

$$Y = b_0 \times e^{b_1 t} \text{ ou } \ln Y = \ln b_0 + b_1 t \quad (11)$$

Onde,

Y = variável dependente que está sendo estimada (DAP);

b₀ = constante;

b₁ = constante;

t = variável independente (altura).

Foram observados os valores de coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajust.), erro padrão da estimativa (S_{yx}) e o valor calculado do teste (F), resultante de cada modelo. Após a seleção dos que apresentaram parâmetros semelhantes ou aproximados, aplicou-se o teste de Valor Ponderado (VP) dos escores propostos por Thiersch (1997) e testado por Hess, Schneider e Finger (2009), Marangon et al. (2016), Miranda, Paro e Costa (2014), Miranda, Junior e Gouveira (2015), Sanquetta et al. (2014), Silva et al. (2009) e Thomas et al. (2006). Nesse método são atribuídos pesos aos parâmetros estatísticos calculados, considerando peso 1 para a equação mais eficiente e pesos crescentes para as demais equações. Dessa forma, o melhor modelo foi definido pelo somatório dos escores, sendo considerada a melhor equação aquela cuja soma dos pesos foi menor.

3.2.5 Validação da equação de DAP

Para a validação da equação de DAP foram utilizados os dados coletados em campo, na parcela da estação experimental do Grupo de Trabalho em Monitoramento Ambiental Geotecnologia e Ensino (GTMAGEO).

Para tanto, aplicou-se o modelo que melhor se ajustou ao estudo, inserindo os valores de altura medidos em campo. Os resultados de DAP estimado, foram comparados aos observados, gerando a correlação existente entre os mesmos. Logo em seguida, foram elaborados gráficos para a representação dos resultados

3.2.6 Estimativa de diâmetro à altura do peito (DAP) a partir de dados LiDAR

Dados LiDAR foram adquiridos gratuitamente para uma área correspondente à 853 ha do município de Petrolina. O processamento para obtenção de altura individual das árvores foi realizado conforme metodologia de Popescu e Zhao (2008), Popescu, Wynne e Nelson (2002), Galvêncio e Popescu (2016), Oliveira et al. (2014), Zandoná, Lingnau e Nakajima (2008) e Giongo et al. (2012).

Após o processamento realizou-se um recorte para uma área de caatinga com 2000m², tamanho equivalente das parcelas demarcadas em campo. Com a obtenção dessas alturas foi possível estimar o diâmetro à altura do peito das árvores identificadas individualmente com os dados LiDAR.

3.3 Resultados e discussão

3.3.1 Modelo para estimativa de diâmetro à altura do peito (DAP)

Na Tabela 1 estão listados os coeficientes e parâmetros para o ajuste dos cinco modelos que apresentaram os maiores valores de coeficientes de determinação ajustado e menor erro da estimativa. No geral, os resultados apresentaram baixos valores de coeficiente de determinação ajustado, onde o melhor valor encontrado foi de 0,607. Alguns fatores podem interferir no resultado, entre os quais destaca-se a complexidade da estrutura que as espécies nativas de caatinga geralmente apresentam

Tabela 1 – Parâmetros para o ajuste dos modelos analisados.

Equação	Coeficientes				R ²	S _{xy}	CV (%)	F
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	Ajust.			
1	3.473	-6.210	-	-	0.479	3.730	69	199.480
2	12.188	-8.847	-	-	0.390	4.037	75	138.862
3	-37.916	17.715	-	-	0.302	4.316	79	94.510
4	-5.869	1.105	12.188	-	0.600	3.266	60	163.260
5	4.327	-1.255	0.170	-1.512	0.607	3.239	58	112.264

Em que: R² Ajust.= coeficiente de determinação ajustado; S_{xy} = erro-padrão da estimativa; CV = coeficiente de variação em porcentagem; F = valor calculado do teste.

Os pesos atribuídos aos parâmetros da estatística e o resultado do Valor Ponderado, com base na proposta de Thiersch (1997), estão representados na Tabela 2. O modelo 6 (Cúbico) obteve o menor Valor Ponderado, equivalente a sete pontos, sendo assim considerado o melhor modelo para estimativa de DAP na vegetação de caatinga presente nas áreas de estudo. O modelo apresentou os seguintes parâmetros: Coeficiente de determinação ajustado de 0,607,

erro-padrão da estimativa de 3.239, coeficiente de variação de 58% e Valor calculado do teste de 112.264.

Tabela 2 – Valor Ponderado e pesos atribuídos aos parâmetros estatísticos.

Equação	Pesos dos Parâmetros Estatísticos				VP
	R ² Ajust.	S _{xy}	CV (%)	F	
1	3	3	3	1	10
2	4	4	4	3	15
3	5	5	5	5	20
4	2	2	2	2	8
5	1	1	1	4	7

Em que: R² Ajust.= coeficiente de determinação ajustado; S_{xy} = erro-padrão da estimativa; CV = coeficiente de variação em porcentagem; F = valor calculado do teste; VP= Valor Ponderado.

O modelo de DAP calibrado para a caatinga (Equação 12) conseguiu explicar cerca de 60% da variação em área de caatinga, sendo representado da seguinte maneira:

$$DAP = 4,327 * A - 1,255 * A^2 + 0,17 * A^3 - 1,512 \quad (12)$$

Onde:

4, 327 = constante B₀;

A = altura total (m);

-1, 255 = constante B₁;

0,17 = constante B₂;

-1,512 = constante B₄.

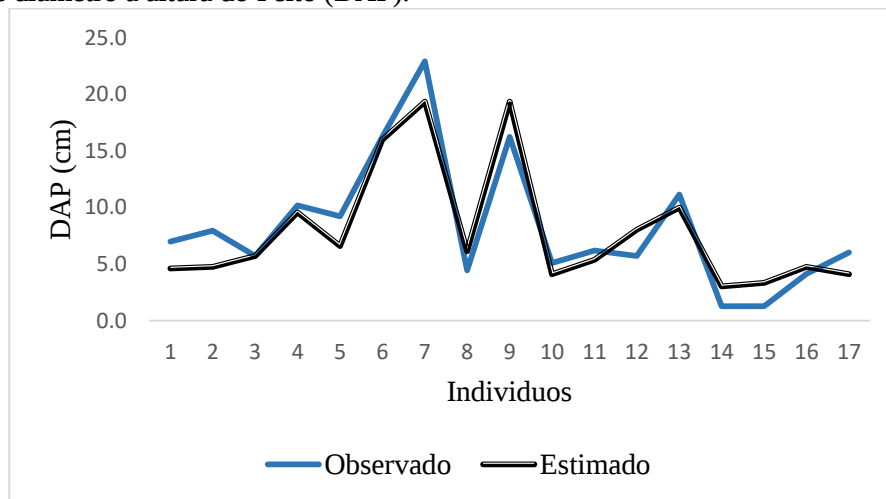
É importante ressaltar que equações de regressão sempre apresentam incertezas, de modo que cada área apresenta diferentes espécies dominantes, entre outros fatores que contribuem para a variação nos resultados. Dessa forma, cabe ao pesquisador identificar as diferenças nas relações alométricas e realizar a análise das condições de extrapolação das equações (RATCHUNE et al., 2016).

3.3.2 Comparação dos dados observados e estimados de DAP

A comparação entre os dados de DAP estimados e observados encontram-se na Figura 4. Observou-se que o padrão de variação entre é detectado em cerca de 90% das amostras. Inicialmente, verificando que o modelo subestima o DAP até a comparação com a amostra 7.

Entretanto, a maior diferença observada é de 3,9 cm (Ponto sete), valor que se encontra dentro de um intervalo aceitável. A partir do Ponto oito, verifica-se que o modelo passa alternar entre superestimava e subestimativa do DAP, onde as maiores diferenças são observadas entre os Pontos 14 e 15. Apesar dos pequenos erros verificados, de maneira geral o resultado é enquadrado com muito bom, com $R^2 = 0,93$.

Figura 13 - Relação entre dados observados em campo e estimados pelo modelo cúbico para estimativa de diâmetro à altura do Peito (DAP).



Fonte: Dados da pesquisa.

3.3.3 Diâmetro estimado a partir dos dados LiDAR

Foram identificados um total de 313 indivíduos para uma área de 2000 m² de vegetação de caatinga, com alturas variando entre 2 e 10,66 m. Na Tabela 2 os valores de DAP estimado com o modelo cúbico, a partir da altura obtida com dados LiDAR, foram subdivididos em seis classes com intervalos de 3 cm, com exceção da última classe que engloba os valores máximos encontrados para a área.

O diâmetro médio encontrado foi de 6,8 cm e a altura média de 6,8 m. A maior concentração de indivíduos encontra-se nas classes diamétricas 1 e 2, representando 58% dos indivíduos identificados, essas classes representam os valores mais baixos de DAP variando de 3,5 a 7,5 cm. Apenas 2 indivíduos apresentaram diâmetro superior a 100 cm.

Tabela 3 – Classes diamétricas obtidas com o modelo cúbico.

Classes	Classes diamétricas (cm)	Quant. de Indivíduos	Quant. de Indivíduos (%)	Classes de Altura(m)
1	3,5 – 5,5	91	29	2 – 3,49
2	5,6 – 7,5	93	30	3,51 – 4,34
3	7,6 – 9,5	55	18	4,35 – 4,89
4	9,6 – 12,5	26	8	4,9 – 5,49
5	12,6 – 15,5	21	7	5,5 – 5,93
6	15,6 – 107,9	27	9	5,96 – 10.66

Fonte: Elaborada pela autora.

Alguns estudos realizados com coletas de dados em campo para áreas de caatinga encontraram resultados semelhantes aos desta pesquisa, como o desenvolvido por Sabino, Cunha e Santana (2016), que identificaram um diâmetro máximo de 68 cm em 2.226 indivíduos/ha, indivíduos medidos em um hectare de caatinga antropizada na Paraíba, aproximadamente 223 por 1000 m². A maior incidência de indivíduos nas classes diamétricas mais baixas, comportamento típico encontrado em análise da vegetação de caatinga. O mesmo valor máximo de DAP foi encontrado em estudo realizado por Araújo (2007) em uma reserva particular de vegetação de caatinga no estado da Paraíba, a altura máxima identificada foi de 10,5 m.

Cordeiro e Oliveira (2010), ao realizar coletas de campo para uma área também de 1000 m² de caatinga localizada no Agreste Paraibano, identificaram 437 indivíduos com critério de inclusão de DAP maior ou igual a 5 cm e altura total das árvores maior que 2 m.

Ao desenvolver um trabalho para uma área de caatinga no Sul do Piauí, Brand et al. (2015) encontraram altura média de 5,6 m, para 4205 indivíduos/há, o equivalente a 420 indivíduos por 1000 m². 76% das árvores mensuradas para esse estudo apresentou diâmetros variando entre 2 a 9 cm. Os resultados estimados com dados LiDAR nesse estudo encontraram 76% dos indivíduos com diâmetros variando de 3,5 à 9 cm.

Os valores de altura e diâmetro encontrados por Pereira Júnior, Andrade e Araújo (2012) em Monteiro – PB correspondem a 17m e 114 cm, respectivamente, sendo a classe de altura predominante de 4,1 a 6 m e o diâmetro 3 a 6 cm. Também na Paraíba Leite et al. (2015) observaram altura mínima de 2 m e máxima de 10,5m, com diâmetro variando de 3,0 a 32,0 cm, com e maior concentração dos indivíduos na classe diamétrica ente 3 e 6 cm. Geralmente, valores elevados de DAP representam uma pequena porcentagem nesses estudos. Lima Júnior et al. (2014) encontraram diâmetros acima de 30 cm apenas para *Amburana cearensis* e

Jatropha molissima em dados coletados de parcelas totalizando 4.000 m² da vegetação de caatinga na Embrapa Semiárido, município de Petrolina.

No município de Buíque – PE, Rodal et al. (1998) amostraram 400 indivíduos para análise fitossociológica, identificando diâmetros e alturas máximas de 5,1 m e 22 cm, respectivamente, com maiores concentrações de altura e diâmetro nas classes de 1 a 2 m e 3 a 6 cm, respectivamente.

3.4 Conclusões

O método do Valor Ponderado com a soma dos escores, utilizado para a escolha do melhor modelo de regressão para estimativa de DAP, apontou a equação cúbica como a mais representativa para a área em estudo, apresentando resultados satisfatórios comprovados na validação da equação, que apresentou uma correlação de 0,93.

A utilização de altura total das árvores derivada de dados LiDAR para a estimativa de DAP, através de equações de regressão, se mostrou uma técnica promissora e que corresponde à realidade, desde que a altura seja estimada de forma adequada.

Os valores de DAP resultantes da estimativa se assemelham aos encontrados em vários estudos que realizaram medição de variáveis da vegetação de caatinga em campo. Deste modo, os métodos empregados para estimativa se mostraram eficientes, podendo ser aplicados para a modelagem do DAP em áreas com características físico-naturais semelhantes, para as quais não se dispõem de dados observados em campo.

4 ESTIMATIVA DE BIOMASSA ARBÓREA EM VEGETAÇÃO DE CAATINGA COM O USO DE EQUAÇÕES ALOMÉTRICAS

4.1 Introdução

O bioma Caatinga está inserido no semiárido brasileiro e abrange os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais, com área de, aproximadamente, 800.000 km², o que equivale a 11% do território nacional e 70% do território nordestino (LIMA; COELHO; OLIVEIRA, 2012). A distribuição espacial das fisionomias e grupos florísticos é determinada, em maior parte, pelo clima, relevo, embasamento geológico e disponibilidade hídrica, o que proporciona uma enorme variedade de ambientes ecológicos (GUEDES et al., 2012).

A vegetação de caatinga é bem adaptada a dupla estacionalidade climática do semiárido, marcada por longos períodos de seca e uma estação chuvosa relativamente curta. Dentre as características morfológicas adaptativas das espécies destacam-se os estômatos protegidos por uma espessa camada de cera, tecidos armazenadores de água mais eficientes e aprofundamento do sistema radicular (BARBOSA et al., 2013; BARROS; SOARES, 2013; TROVÃO et al., 2007).

Este bioma é um dos menos conhecidos cientificamente no Brasil, porém está entre os mais degradados. A degradação tem relação direta com o modelo de desenvolvimento socioeconômico introduzido na região, que comporta atividades como a extração de madeira, agricultura de subsistência e intensiva, pecuária, mineração de gesso, entre outros. Outro ponto de desequilíbrio diz respeito à ocupação da região. Entre as regiões semiáridas encontradas no mundo, a brasileira é a mais povoada, este dado ajuda a explicar o avançado nível de deterioração do bioma, que está sob intensa exploração de seus recursos, sem maiores preocupações (JÚNIOR; DRUMOND, 2011).

Estimativas de biomassa florestal se tornaram importantes para questões relacionadas ao manejo florestal e alterações no clima, permitindo a estimativa de estocagem de carbono (HIGUCHI et al., 1998). As florestas representam importantes fontes e sumidouros de carbono e, à medida que isso ocorre, produz biomassa que fica armazenada no componente arbóreo, variando de acordo com a composição de espécies, tamanho populacional, tamanho das árvores (diâmetro e altura), idade, densidade básica da madeira e estágio de sucessão da floresta (SOUZA et al., 2012).

Uma das maneiras para estimar a variável biomassa é por meio do desenvolvimento de modelos alométricos. Nestes modelos são inseridas variáveis da vegetação que podem ser obtidas em campo, chamadas de independentes e que permitem a estimativa de outras variáveis, as dependentes. O desenvolvimento de estudos dessa natureza é fundamental para a compreensão de aspectos ecológicos e evolutivos em espécies de plantas. Os modelos gerados a partir de pesquisas podem ser ferramentas poderosas para a gestão de áreas florestais (MOGNON et al., 2015).

Neste sentido, novas metodologias têm sido desenvolvidas e aperfeiçoadas para estimar, com precisão, a biomassa vegetal em ecossistemas naturais. Santana et al. (2016) quantificaram a biomassa em uma área de floresta na Cataluña – Espanha, com o uso de equações de regressão. Para ajustes das equações foram inseridas variáveis resultantes de processamento com dados LiDAR. Nesse estudo, a biomassa estimada por meio de dados LiDAR resultou em 3059,76 toneladas para uma área de 24,52 ha, enquanto que o cálculo de inventário florestal da área resultou em 3341,42 toneladas na mesma área, constatando-se a importância dos dados LiDAR para projeções confiáveis nesse tipo de estudo.

No Brasil, estudos para a estimativa de biomassa em áreas de Caatinga ainda são escassos. Pode-se destacar o trabalho conduzido por Sampaio e Silva (2005), que desenvolveram equações alométricas com base na altura da planta, diâmetro à altura do peito (DAP) e dados de densidade para espécies de caatinga, utilizando método destrutivo para a obtenção dos dados de densidade. Os resultados das equações para a obtenção de biomassa em função do DAP foram validados para árvores com diâmetros de até 30 cm, acima desse valor são necessários dados de densidade das espécies. Posteriormente, um estudo semelhante foi desenvolvido por Silva e Sampaio (2008); os autores afirmaram que a biomassa de partes das plantas pode ser estimada a partir de medidas de diâmetro, utilizando processo confiável e não destrutivo.

Lima Júnior et al. (2014) estimaram biomassa lenhosa para 16 espécies diferentes, em uma área de caatinga do município de Petrolina – PE, com a utilização de equação alométrica, encontrando resultados satisfatórios, que foram posteriormente correlacionados com índices de vegetação, apresentando significância estatística para a correlação.

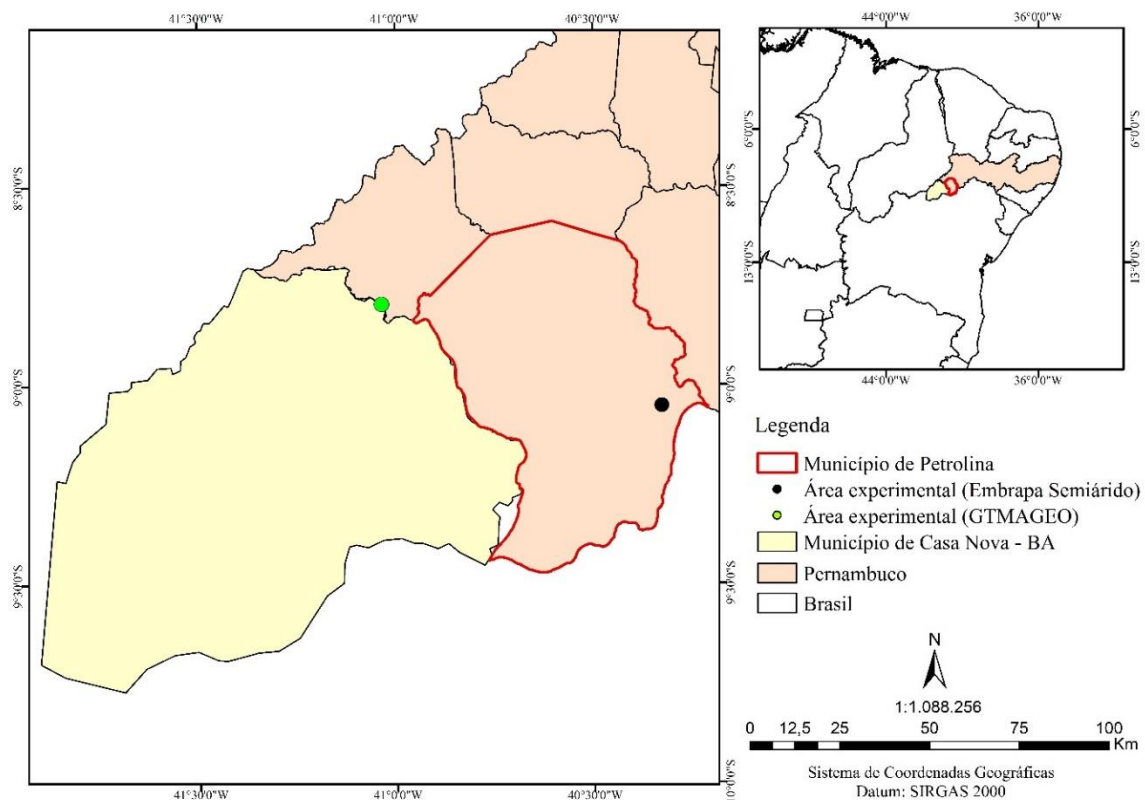
Neste sentido, este trabalho tem por objetivo estimar a biomassa em áreas preservadas e antropizadas de vegetação de caatinga, utilizando dados LiDAR.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Caracterização da área de estudo

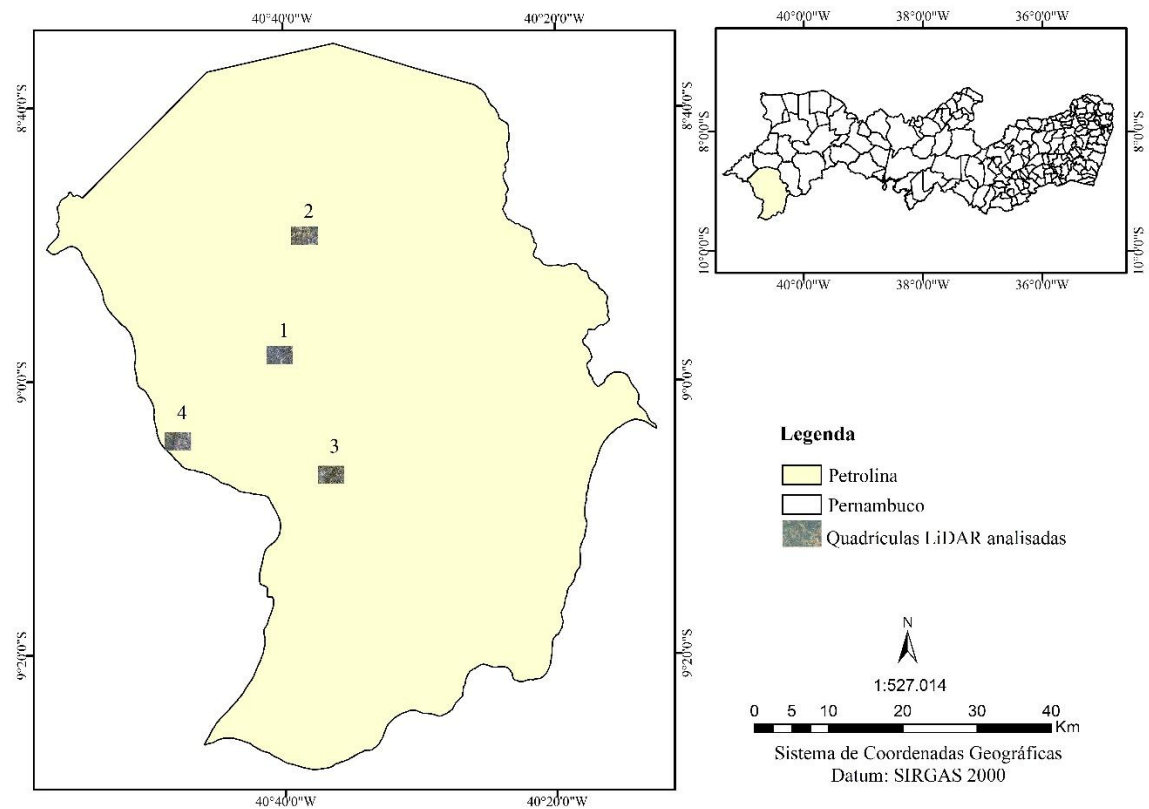
As áreas de coleta de dados em campo (Figura 1) e áreas de dados laser adquiridos (Figura 1), estão inseridas no município de Petrolina – PE e Casa Nova – BA, ambas localizadas no semiárido nordestino. Na região, a precipitação média anual varia em torno de 500 mm, com período chuvoso ocorrendo no período entre novembro e abril. O clima foi classificado por Koppen como tropical semiárido, onde a temperatura média é de 26°C. A predominância da vegetação é do tipo caatinga hiperxerófila, bem adaptada às condições climáticas severas da região; apresenta porte variando de arbustivo a arbóreo, relativamente adensado, geralmente com árvores retorcidas e espinhosas, com predominância de espécies caducifólias.

Figura 14 – Localização das coletas de campo.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 15 – Localização dos dados laser



Fonte: Elaborada pela autora.

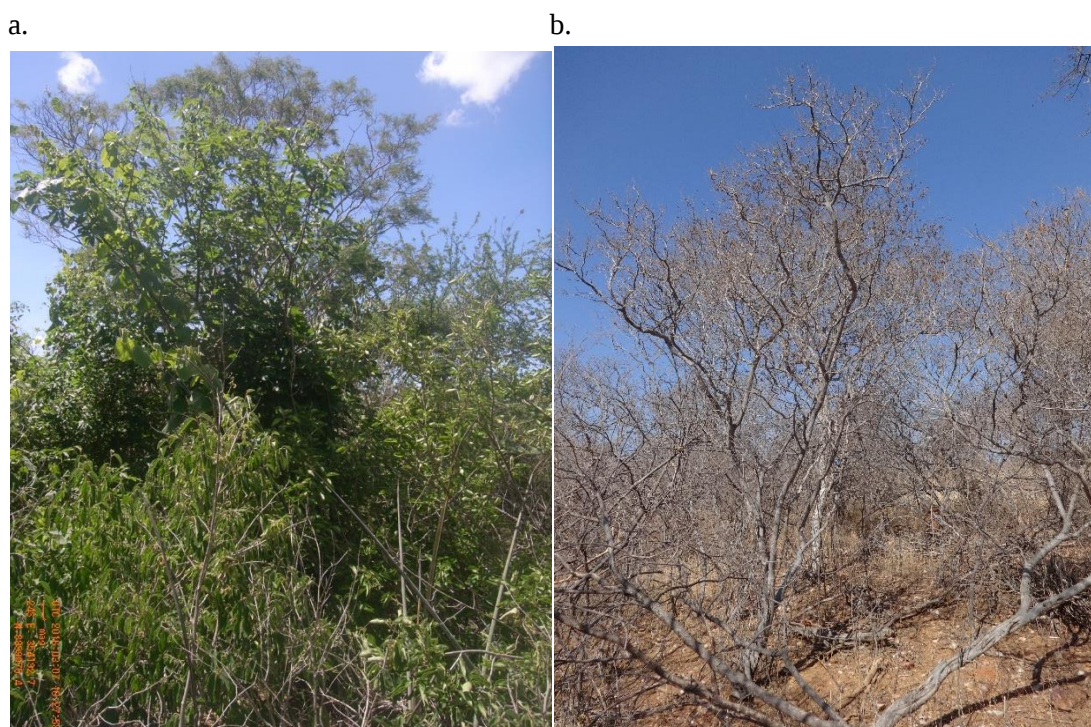
4.2.2 Obtenção de dados de campo

Os dados coletados em campo consistiram na medição de altura total e circunferência à altura do peito de árvores aleatórias, assim como a identificação das espécies amostradas. Foram alocadas seis parcelas de 20x20 m em duas áreas distintas de vegetação de caatinga. Cinco delas estão em área preservada da Embrapa Semiárido, em um Sítio de pesquisas do Projeto de Pesquisas Ecológicas de Longa Duração da rede PELD, que possui Sítios de pesquisas implantados em diferentes biomas brasileiros. A última parcela foi demarcada em uma área de caatinga antropizada no município de Casa Nova na Bahia em uma estação experimental do Grupo de Trabalho em Monitoramento Ambiental Geotecnologia e Ensino (GTMAGEO) da Universidade de Pernambuco – Campus Petrolina.

As coletas de dados no município de Casa Nova ocorreram em março de 2015, durante a estação seca na região. No sítio PELD da Embrapa Semiárido foram realizadas em março de 2016, durante a estação chuvosa, fator que não interferiu nas medições das variáveis da vegetação.

Os dados de altura foram coletados com hipsômetro (*OPTI-Logic*), onde o observador projeta o laser para a aquisição de medidas de altura das plantas, desde o topo da copa das árvores até sua base. As medidas de circunferência à altura do peito foram adquiridas com o uso de fita métrica e tomadas a 1,30 m do solo, como é recomendado internacionalmente para a padronização dos estudos. A identificação das espécies ocorreu de forma mais clara durante a coleta de dados na estação chuvosa, na Embrapa semiárido em Petrolina, em função da vegetação se encontrar regenerada, com a presença da folhagem por completo (Figura 3-a), facilitando a identificação das espécies pelo observador. Na coleta realizada durante o período seco, no município de Casa Nova, foi necessário que um morador local identificasse as espécies pelo nome popular, pois as mesmas encontravam-se sem folhas (Figura 3-b).

Figura 16 - (a) Aspecto da vegetação no Sítio PELD na Embrapa Semiárido durante a estação chuvosa. (b) Aspecto da vegetação na área experimental do grupo GTMAGEO durante a estação seca.



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2.3 Cálculo do diâmetro à altura do peito (DAP)

A partir dos dados de circunferência à altura do peito (CAP) medidos nas árvores em campo, foi aplicada a Equação 1 para a obtenção do diâmetro à altura do peito (DAP).

$$DAP = \left(\frac{CAP}{\pi} \right) \quad (1)$$

Onde,

DAP = diâmetro à altura do peito;

CAP = circunferência à altura do peito;

$\pi = 3,1415$.

4.2.4 Obtenção de dados LiDAR

Na plataforma do Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D) (PERNAMBUCO, 2016) foram adquiridos, de forma gratuita os produtos de modelo digital de elevação (MDE) referentes aos dados do mapeamento Light Detection And Ranging (LiDAR) para áreas de vegetação de caatinga do município de Petrolina. Os dados são disponibilizados na forma de quadrículas que possuem, aproximadamente, 800 ha; para esse estudo foram adquiridas quatro quadrículas correspondentes às áreas de vegetação de caatinga. Não foi possível a aquisição dos dados para a área de coleta de campo em Pernambuco, tendo em vista que o projeto é uma iniciativa recente e seus produtos estão sendo liberados aos poucos à medida que são atestados pelo órgão responsável.

O projeto para mapeamento 3D do território pernambucano realizado pelo governo do estado, teve duração de um ano, com início em janeiro de 2014 e termino no fim de 2015, até o momento aproximadamente 30% dos produtos foram disponibilizados em <http://www.pe3d.pe.gov.br/mapa.php>. No caso do município de Petrolina, os dados disponíveis até o momento equivalem a 50% do território, correspondendo a porção oeste do mesmo.

4.2.5 Estimativa de altura e diâmetro à altura do peito com dados LiDAR

O processamento dos dados LiDAR foi realizado, primeiramente no *software QT Modeler* (*Quick Terrain Modeler* v. 8.0.2), para geração do modelo de altura das copas ou *Canopy Height Model* (CHM). Como os resultados podem apresentar possíveis valores negativos, é necessária a exclusão dos mesmos e, para isso, foi utilizado o *software* ENVI 5.0. Para a individualização das alturas identificadas no CHM, esses dados foram importados no *software* gratuito TreeVaW v1.1, que realiza este procedimento através de um modelo matemático apresentado na Equação (2). Os resultados provenientes desse *software* são gerados em formato de texto, com valores altura e suas equivalentes coordenadas. Estes dados foram espacializados no *software ArcMap*, sendo transformado em arquivo vetorial.

$$CW = hgt^3 + 0,0213 \times hgt^2 + 0,0019 \times hgt + 2,19130 \quad (2)$$

Onde:

hgt = altura;

0,0213 = constante B₁;

0,0019 = constante B₂;

2,19130 = constante B₃.

A partir dos valores de altura obtidos com dados LiDAR para as quatro quadrículas, foi estimado o DAP para as árvores identificadas, com a utilização da Equação 3, proveniente de modelo de regressão ajustado para a vegetação de caatinga.

$$DAP = 4,327 * A - 1,255 * A^2 + 0,17 * A^3 - 1,512 \quad (3)$$

Onde:

4, 327 = constante B₀;

A = altura total (m);

-1, 255 = constante B₁;

0,17 = constante B₂;

-1,512 = constante B₄.

4.2.6 Estimativa de biomassa arbórea

A estimativa de biomassa vegetal foi realizada, tanto para os dados obtidos em campo, quanto para os dados estimados com o LiDAR. Para tanto, utilizou-se a equação alométrica (Equação 4) desenvolvida por Sampaio e Silva (2005) para áreas de vegetação de caatinga. Essa equação é indicada para valores de DAP entre 3 e 30 cm, e para se adequar ao estudo só foram utilizados dados dentro desta margem de variação, tanto obtidos em campo, quanto estimados com a altura proveniente dos dados LiDAR.

$$0,1730 \times DAP^{2,2950} \quad (4)$$

Onde:

0,1730 = constante *a*;

DAP = Diâmetro à altura do peito;

2,2950 = constante b .

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Biomassa estimada com dados de campo

4.3.1.1 Dados coletados em área de vegetação de caatinga preservada

Nas cinco parcelas amostradas nessa área foram coletados dados de 117 indivíduos, os quais pertencem a oito espécies da caatinga e seis famílias botânicas distintas. A espécie que apresentou maior ocorrência na área foi a Sete-cascas (*Handroanthus spongiosus*) da família Bignoniaceae, representando 22,2% da dominância na área amostrada. Porém, ao considerar a família Euphorbiaceae, da qual foram amostradas as espécies Burra-leiteira (*Sapium sp.*), Favela (*Cnidoscolus quercifolius*), Maniçoba (*Manihot pseudoglaziovii*), Pinhão (*Jatropha mutabilis*) e Quebra-faca (*Croton conduplicatus*), as quais representaram em conjunto 42% do total das amostras, com 49 indivíduos. A mais representativa foi a Burra-leiteira (*Sapium sp.*) com 18 indivíduos e a que se mostrou menos presente foi o Pinhão (*Jatropha mutabilis*), com apenas 1 indivíduo amostrado.

A espécie Catingueira (*Poincianella pyramidalis*) e Jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*) da família Fabaceae também foram encontradas com frequência, representando cada uma 9,4% da dominância para a área. As outras duas espécies dessa família foram Angico (*Anadenanthera colubrina*) e Mororó (*Bauhinia cheilantha*) que, somadas, correspondem a apenas 4,3% dos indivíduos.

A espécie Umburana (*Commiphora leptophloeos*) da família Burseraceae representou 8,5% da ocorrência na área. As famílias Anacardiaceae e Celastraceae foram as menos representativas para a área, com as espécies Pau-Branco (*Fraunhofer multiflora*) e Umbuzeiro (*Spondias tuberosa*) que, somadas, equivalem a 4,3% da dominância na área amostrada.

Em estudo desenvolvido por Lima Júnior et al. (2014) para esta mesma área, foram amostrados 312 indivíduos e os resultados mostraram que as famílias que apresentaram maior frequência foram a Fabaceae e Euphorbiaceae, com as espécies Catingueira, Maniçoba, Jurema-preta e Marmeleiro; as três primeiras foram aquelas que apresentaram maior dominância na área de estudo.

Tabela 1 – Espécies identificadas em área preservada

Espécie	Nome Científico	Família	T.I.	Dominância (%)
Angico	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brendan	Fabaceae	1	0,9
Brurra-leiteira	<i>Sapium</i> sp.	Euphorbiaceae	18	15,4
Catingueira	<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.) L. P. Queiroz	Fabaceae	11	9,4
Favela	<i>Cnidocolus quercifolius</i> Pohl.	Euphorbiaceae	7	6,0
Maniçoba	<i>Manihot pseudoglaziovii</i> Mull. Arg.	Euphorbiaceae	16	13,7
Mororó	<i>Bauhinia cheilantha</i> (Bong.) Steud.	Fabaceae	4	3,4
Pau-branco	<i>Fraunhoferia multiflora</i> Mart.	Celastraceae	3	2,6
Pinhão	<i>Jatropha mutabilis</i> (Pohl.) Baill	Euphorbiaceae	1	0,9
Quebra-faca	<i>Croton conduplicatus</i> Kunth.	Euphorbiaceae	7	6,0
Sete-cascas	<i>Handroanthus spongiosus</i> (Rizzini) S. O. Grose	Bignoniaceae	26	22,2
Umburana	<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) J. B. Gillett	Burseraceae	10	8,5
Umbuzeiro	<i>Spondias tuberosa</i> Arruda	Anacardiaceae	2	1,7
Jurema-preta	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir.	Fabaceae	11	9,4
Total			117	100

Em que: T.I.= Total de Indivíduos.

A biomassa total estimada para os indivíduos mensurados totalizou 2.266,9 kg. Os valores de biomassa estão apresentados subdivididos por grupo de espécie na Tabela 2, que também apresenta altura e diâmetro médio para cada grupo.

As famílias Bignoniaceae, Burseraceae, e Euphorbiaceae dominaram em termos de quantidade de biomassa, as duas primeiras, se destacando com as espécies Sete-cascas e Umburana, com 587,9 e 370,6 kg, respectivamente. Vale ressaltar, que foram amostrados 26 indivíduos para a espécie Sete-cascas, enquanto que para a Umburana foram apenas 10, o que evidencia a capacidade da Umburana de produzir biomassa. A espécie Burra-leiteira da (Euphorbiaceae) apresentou os maiores valores de biomassa lenhosa com 531,8 kg de biomassa lenhosa, tendo em vista que foram amostrados 18 indivíduos dessas espécies também fica comprovado que a sua capacidade de produção de biomassa é superior à Sete-cascas, pois com uma quantidade inferior de indivíduos a mesma detém, aproximadamente, o mesmo valor de biomassa lenhosa que a anterior. As outras espécies da família Euphorbiaceae se mostraram mais representativas quanto aos valores totais de biomassa em relação à Maniçoba e à Favela, com 50,60 e 181,0 kg respectivamente, tendo a primeira 16 árvores amostradas e a segunda 7.

A família Fabaceae, com as espécies Angico, Catingueira, Mororó e Jurema-preta apresentaram 410,6 kg da biomassa estimada. As espécies que mais contribuíram para esse resultado foram a Catingueira e a Jurema-preta, as quais tiveram a mesma quantidade de indivíduos amostrados, 11, e obtiveram valores de biomassa lenhosa correspondentes a 165,4 e 179,9 kg, respectivamente. A altura média encontrada para essas duas espécies foi muito semelhante, 4,4 e 4,5 m, enquanto os valores de DAP médio foi maior para Jurema-preta, com 7,0 cm. Embora tenha sido medido apenas um indivíduo de Angico, seu valor de biomassa mostrou-se bastante representativo, 56,1 kg, o que se deve ao fato do seu elevado valor de DAP, que foi de 12,4 cm, somado à altura de 5,1 m.

Os menores valores de biomassa foram encontrados em Mororó, Pinhão e Quebra-faca, com 4, 1 e 7 indivíduos, respectivamente. A soma das biomassas dessas espécies alcançam 41,4 kg, valor considerado muito baixo e equivalente aos valores médios de altura e DAP, que, em conjunto, correspondem aos menores em relação às demais espécies amostradas, uma vez que estas não são consideradas de alto porte. Diferentemente dos valores encontrados para o único indivíduo de Umbuzeiro da família (Anacardiaceae) mensurado em campo, para o qual foi estimado 69,9 kg de biomassa, esse indivíduo apresentou altura de 4,9 m e DAP de 9,9 cm.

Ao realizar a estimativa de biomassa, Silva e Sampaio (2008) mediram, em campo, altura e DAP de indivíduos pertencentes a nove espécies diferentes, em áreas de caatinga do município de Petrolina -PE e Santaluz – BA. Os indivíduos mensurados foram divididos em dois grupos, considerando espécies de pequeno e grande porte. A estimativa de biomassa mostrou que os valores foram maiores no grupo de indivíduos de maior porte, porém, em ambos os grupos, os indivíduos com maior quantidade de biomassa foram os que apresentaram maior valor de DAP. Entre as espécies amostradas estão o Pinhão, considerada de menor porte, e o Angico, de porte elevado.

Tabela 2 – Biomassa total por grupos de espécies em áreas preservadas.

Espécie	Nome Científico	Família	H (m)	DAP (cm)	B.T. (Kg)
Angico	<i>Anadenanthera colubrina</i> (Vell.) Brenan)	Fabaceae	5,1	12,4	56,1
Brurra-leiteira	<i>Sapium</i> sp.	Euphorbiaceae	4,0	7,0	531,8
Catingueira	<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.) L. P. Queiroz	Fabaceae	4,5	5,7	165,4
Favela	<i>Cnidoscolus phyllacanthus</i> Pohl.	Euphorbiaceae	3,7	5,1	50,6
Maniçoba	<i>Manihot pseudoglaziovii</i> Pax et K. Hoffman	Euphorbiaceae	3,6	5,5	181,0
Mororó	<i>Bauhunia cheilantha</i> (Bong.) Steud.	Fabaceae	3,5	3,0	9,2
Pau-branco	<i>Fraunhoferia multiflora</i> Mart.	Celastraceae	4,5	5,1	32,4
Pinhão	<i>Jatropha mollissima</i> (Pohl) Baill	Euphorbiaceae	1,7	5,7	9,5
Quebra-faca	<i>Croton conduplicatus</i> Kunth.	Euphorbiaceae	3,3	3,7	22,7
Sete-cascas	<i>Handroanthus spongiosus</i> (Rizzini) S. O. Grose	Bignoniaceae	3,2	4,1	587,9
Umburana	<i>Commiphora leptophloeos</i> (Mart.) Gillett	Burseraceae	3,7	7,9	370,6
Umbuzeiro	<i>Spondias tuberosa</i> Arruda	Anacardiaceae	4,9	9,9	69,9
Jurema-preta	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir	Fabaceae	4,4	7,0	179,9
				Total	2266,9

H = altura total em metros; DAP = Diâmetro à altura do peito em centímetro; B.T. = biomassa total em kg.

4.3.1.2 Dados coletados em área de vegetação de caatinga antropizada

Durante a coleta de dados na parcela de vegetação degradada foram mensurados 17 indivíduos pertencentes a cinco espécies de três famílias botânicas. A família dominante na parcela foi a Fabaceae, com ocorrência das espécies Catingueira (*Poincianella pyramidalis* (Tul.) L. P.), com cinco indivíduos identificados, e Jurema-preta (*Mimosa tenuiflora*), com três indivíduos mensurados. Essas espécies representam 47% da dominância na parcela. A família Euphorbiaceae aparece como a segunda mais encontrada, com cinco indivíduos, sendo quatro de Mameleiro (*Croton sonderianus*) e um de Quebra-faca, correspondendo a 29,4% da dominância na área. A família Bignoniaceae, apresentou quatro indivíduos da espécie Sete-cascas (*Handroanthus spongiosus* (Rizzini) S. O. Grose), com 23,5% das espécies amostradas.

O Mameleiro (*Croton sonderianus* Muell. Arg.) foi apontado como uma das espécies dominantes em trabalhos desenvolvidos por Amorim, Sampaio e Araújo (2005), Brand et al. (2015) e Lima Júnior et al. (2014) para áreas de vegetação de caatinga. Nesses estudos,

Catingueira, Jurema-preta e Maniçoba também foram encontradas com maior frequência nas áreas amostradas.

Tabela 3 – Espécies identificadas em área degradada.

Espécie	Nome Científico	Família	T.I.	Dominância (%)
Catingueira	<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.) L. P. Queiroz	Fabaceae	5	29,4
Jurema-preta	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir	Fabaceae	3	17,6
Marmeleiro	<i>Croton sonderianus</i> Muell. Arg.	Euphorbiaceae	4	23,5
Sete-cascas	<i>Handroanthus spongiosus</i> (Rizzini) S. O. Grose	Bignoniaceae	4	23,5
Quebra-faca	<i>Croton conduplicatus</i> Kunth.	Euphorbiaceae	1	5,9
Total			17	100

Em que: T.I.= Total de Indivíduos.

A biomassa estimada para as árvores medidas em campo totalizou 827,3 kg. Analisando a biomassa por grupo de espécie notou-se que a maior concentração foi encontrada no grupo de espécie Sete-cascas, que apresentou, para os quatro indivíduos mensurados, 221,3 kg de biomassa lenhosa, mesmo não sendo a espécie mais representativa na parcela. Esses indivíduos apresentaram o maior valor médio de altura e diâmetro à altura do peito em relação às outras espécies. Os três indivíduos de Jurema-Preta apresentaram 128,4 kg de biomassa, valor que foi superado pelo grupo da espécie Catingueira, com 187,1 kg de biomassa, mas que em contrapartida contou com cinco indivíduos mensurados. O grupo do Marmeleiro (Euphorbiaceae), que contou com quatro indivíduos amostrados, apresentou apenas 13,2 kg de biomassa lenhosa. Este baixo valor se deveu, principalmente, ao pequeno porte da espécie que, consequentemente, apresentou os menores valores de DAP e altura considerando os indivíduos medidos na área. A Quebra-faca, (Euphorbiaceae) foi a menos representativa na parcela, apenas um indivíduo foi encontrado e sua biomassa foi estimada em 9,5 kg, com uma altura de 4,5 m e DAP de 5,7 cm.

Tabela 4 – Biomassa total por grupos de espécies em área degradada.

Espécie	Nome Científico	Família	H (m)	DAP (cm)	B.T. (Kg)
Catingueira	<i>Poincianella pyramidalis</i> (Tul.) L. P. Queiroz	Fabaceae	3,6	7,0	187,1
Jurema-preta	<i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir	Fabaceae	3,0	7,9	128,4
Marmeleiro	<i>Croton sonderianus</i> Muell. Arg.	Euphorbiaceae	2,9	3,0	13,2
Sete-cascas	<i>Handroanthus spongiosus</i> (Rizzini) S. O. Grose	Bignoniaceae	5,5	10,8	221,3
Quebra-faca	<i>Croton conduplicatus</i> Kunth.	Euphorbiaceae	4,5	5,7	9,5
Total					827,3

H = altura total em metros; DAP = Diâmetro à altura do peito em centímetro; B.T. = biomassa total em kg.

4.3.2 Biomassa estimada com dados LiDAR

Na Tabela 5 é possível observar o total de indivíduos identificados para cada uma das quatro quadrículas LiDAR analisadas, bem como o seu valor de biomassa lenhosa total em toneladas, obtido através das alturas identificadas com LiDAR e estimativa de DAP a partir de modelo alométrico.

Cada quadrícula possui uma área de, aproximadamente, 853ha. A quadrícula 1 e 4 não apresentaram valores muito distintos no total de indivíduos, foram identificados 256.435 e 243.552, respectivamente. A diferença surgiu no total de biomassa encontrado, pois a quadrícula 4, localizada no extremo oeste da porção mais central do município de Petrolina apresentou 2.261 toneladas de biomassa a mais que na quadrícula 1, que ficou mais próxima à porção central do município onde foram identificados, aproximadamente, 13.000 indivíduos a mais, revelando que muitos indivíduos na quadrícula 4 podem ter o porte mais elevado ou maior valor de DAP.

As quadrículas 2 e 3 possuem muitas áreas com introdução de práticas agrícolas, principalmente a de número 3, que correspondeu à área mais degradada dentre as quatro quadrículas analisadas. Essas informações foram obtidas através da observação de imagens de alta resolução e foram comprovadas através da identificação dos indivíduos com dados LiDAR, que resultou no valor de 81.496 árvores identificadas e 1.262 t de biomassa total, valor extremamente baixo quando comparado às outras 3 quadrículas.

Tabela 5 – Total de indivíduos identificados por quadrícula LiDAR

Quadrículas	T.I.	B.T. (t)
1	256.435	4.292
2	233.771	5.519
3	81.496	1.262
4	243.552	6.553
Total	815.254	17.627,28

Em que: T.I.= Total de Indivíduos; B.T.(t)= Total de Biomassa em tonelada por 853ha.

Os valores totais de indivíduos e de biomassa, por quadrícula foram subdivididos por classes de DAP na Tabela 6 para serem melhor analisados. As classes de diâmetro à altura do peito foram divididas em intervalos de 3 cm, entre o valor mínimo de 3 cm até 30 cm.

Observou-se que nas quatro quadrículas analisadas, a concentração maior do número de indivíduos ocorreu nas classes 1 e 2 de DAP, que variou de 3 a 9 cm, e representou, em cada quadrícula, mais de 70% do valor total de biomassa lenhosa encontrada. Essa concentração foi diminuindo gradativamente à medida que a classe de DAP aumentou, acompanhando do valor de biomassa total que se manteve, em geral, de forma decrescente para as áreas à medida que o valor da classe de DAP aumenta, exceto para algumas exceções que ocorreram em alguns intervalos, tendo em vista o número inferior de espécie com essas características.

Os valores mais baixos para cada classe, principalmente nas últimas que variou de 21 a 30 cm, encontrara-se na quadrícula 3 que estava localizada mais próxima ao Sul do município de Petrolina, e foi mencionada anteriormente como a mais antropizada dentre as quadrículas. A quadrícula 4, mais à oeste do município apresentou maior quantidade de indivíduos nas últimas classes de DAP em relação às outras áreas, justificando o fato da mesma ter apresentado altos valores de biomassa total, mesmo apresentando menos indivíduos que a quadrícula 1, onde a concentração maior de espécies se deu na classe de DAP que variou de 3,0 a 6,0 cm.

Tabela 6 – Total de indivíduos e biomassa estimada com dados LiDAR por classe diamétrica.

Classes	Classes DAP (cm)	Biomassa por quadrícula e classe diamétrica											
		Quadrícula 1			Quadrícula 2			Quadrícula 3			Quadrícula 4		
		T.I.	B. (t)	B. (%)	T.I.	B (t)	B. (%)	T.I.	B (t)	B. (%)	T.I.	B (t)	B. (%)
1	3,0 – 6,0	167.028	868,2	65,1	131.864	722,3	56,4	56.603	297,4	69,5	127.398	696,4	52,3
2	6,1 - 9,0	57.782	947,7	22,5	59.213	970,5	25,3	15.757	257,8	19,3	62.998	1048,5	25,9
3	9,1 - 12,0	16.736	617,2	6,5	19.908	732,2	8,5	4.833	176,2	5,9	24.370	899,1	10,0
4	12,1 - 15,0	6.898	461,7	2,7	9.352	622,1	4,0	1.883	123,8	2,3	11.806	783,9	4,8
5	15,1 - 18,0	3.420	365,3	1,3	5.066	537,1	2,2	1.014	106,4	1,2	6.452	684,0	2,6
6	18,1 - 21,0	1.450	215,6	0,6	3.362	535,1	1,4	685	103,7	0,8	4.137	647,3	1,7
7	21,1 - 24,0	1.689	346,8	0,7	2.147	469,2	0,9	339	74,0	0,4	2.816	615,0	1,2
8	24,1 - 27,0	837	244,5	0,3	1.573	457,7	0,7	231	66,4	0,3	1.978	575,8	0,8
9	27,1 - 30,0	597	225,5	0,2	1.286	483,4	0,6	151	56,9	0,2	1.597	603,1	0,7

T.I.= Total de Indivíduos; B.(t)= Total de Biomassa em tonelada por classe; B. (%) = Biomassa total em porcentagem.

4.4 Conclusões

A espécie Sete-cascas da família botânica Bignoniaceae se mostrou como a mais frequente encontrada nas áreas do campo e apresentou os maiores valores de biomassa lenhosa por grupo de espécie. Porém, a Umburana da família (Burseraceae) apresentou valores elevados de biomassa com menos indivíduos mensurados.

A maior diferença encontrada entre a área preservada e antropizada, além da redução significativa no número de indivíduos de uma para a outra, foi a presença do Marmeleiro da (Euphorbiaceae) na área antropizada. Por outro lado, nenhum indivíduo dessa espécie foi identificado dentre os mensurados na área preservada.

O método de estimativa das variáveis altura total e diâmetro à altura do peito através de dados LiDAR e equação alométrica se mostrou eficiente, principalmente, quando analisada grande quantidade de indivíduos.

A estimativa de biomassa através de modelo de regressão se mostrou eficiente e compatível com os dados de altura e DAP, com variações esperadas, considerando as mudanças no porte das plantas, comprovando ser possível estimar a biomassa lenhosa com um certo nível de confiança, utilizando dados LiDAR, sem a necessidade da aplicação de qualquer método destrutivo.

5 CONCLUSÕES GERAIS

A tecnologia LiDAR se mostrou eficiente para a estimativa de variáveis dendrométricas, podendo ser aplicada para vastas extensões de território para a obtenção de uma maior gama de informações com baixo custo e respostas rápidas.

O modelo de regressão para a estimativa de diâmetro à altura do peito em vegetação de caatinga apresentou resultados satisfatórios mostrando, ser uma técnica promissora, a partir de métodos eficazes para a estimativa da altura.

A estimativa de biomassa, através de modelo de regressão, foi eficiente e compatível com os dados de altura e diâmetro à altura do peito para cada espécie analisada, com variações de acordo com as mudanças no porte das plantas amostradas, o que comprova ser possível a estimativa de biomassa lenhosa, sem que seja necessária a aplicação de qualquer método destrutivo.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, I. L. DE; SAMPAIO, E. V. S. B.; ARAÚJO, E. D. L. Flora e estrutura da vegetação arbustivo-arbórea de uma área de caatinga do Seridó, RN, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, v. 19, n. 3, p. 615–623, 2005.
- ANDRADE, E. A.; HIGUCHI, N. Produtividade de quatro espécies arbóreas de terra firme da Amazônia Central. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 39, n. 1, p. 105–112, 2009.
- ARAÚJO, L. V. C. de. 2007. 111 f. **Composição florística, fitossociologia e influência dos solos na estrutura da vegetação em uma área de caatinga no semi-árido paraibano**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2007.
- BALBINOT, R. et al. Ajuste de equações alométricas para *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. utilizando análise de componentes principais conjuntamente com análise de regressão. **Floresta**, Curitiba, v. 39, n. 2, p. 232–237, 2009.
- BARBOSA, M. L. et al. Crescimento inicial de espécies ocorrentes no semiárido brasileiro: biomassa, biometria e análise morfogênica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 6, n. 3, p. 522–539, 2013.
- BARROS, I. O.; SOARES, A. A. Adaptações anatômicas em folhas de marmeleiro e velame da caatinga brasileira. **Revista Ciencia Agronomica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 192–198, 2013.
- BRAND, M. A. et al. Caracterização da vegetação da caatinga do sul do Piauí para geração de energia. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 477–486, 2015.
- CALIXTO JÚNIOR, J. T.; DRUMOND, M. A. Estrutura fitossociológica de um fragmento de caatinga sensu stricto 30 anos após corte raso, Petrolina-PE, Brasil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 67–74, 2011.
- CIRILO, J. A. et al. Pernambuco Tridimensional: Base de dados espaciais para planejamento urbano e gestão territorial. In: SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 12., 2014, Natal. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2014. p. 1-9.
- CORDEIRO, J. M. P.; OLIVEIRA, A. G. DE. Levantamento fitogeográfico em trecho de caatinga hipoxerófila – Sítio Canafístula, Sertãozinho – Paraíba, Brasil. **Revista Okara: Geografia em debate**, João Pessoa, v. 4, n. 1–2, p. 54–65, 2010.
- COSTA, T. C. E C. DA et al. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 21, p. 961–974, 2009.

GALVINCIO, J. D.; POPESCU, S. C. Measuring individual tree height and crown diameter for mangrove trees with airborne LiDAR data. **International Journal of Advanced Engineering, Management and Science**, New Delhi, v. 2, n. 5, p. 431–443, 2016.

GARIGLIO, M. A. (Org) et al. Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. Brasília: SFB, 2010.

GIONGO, M. et al. Estimativa da altura da base das copas com o uso de dados laser scanning aerotransportado (LiDAR). **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Tocantins, v. 3, p. 48–57, 2012.

GIONGO, M. et al. LiDAR : princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p. 231–244, 2010.

GUEDES, R. D. S. et al. Caracterização florístico-fitossociológica do componente lenhoso de um trecho de caatinga no semiárido Paraibano. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 2, p. 99–108, 2012.

HESS, A. F.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Crescimento em diâmetro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em função da idade, em três regiões do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 1, p. 7–22, 2009.

HIGUCHI, N. et al. Biomassa da parte aérea da vegetação da floresta tropical úmida de terra-firme da amazônia brasileira. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 28, n. 2, p. 153–166, 1998.

IBGE, 2010. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em:
<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php?lang=_EN>. Acesso em: 21 Jul. 2016.

JÚNIOR, C. D. L. et al. Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 289–298, 2014.

JÚNIOR, J. T. C.; DRUMOND, M. A. Estrutura fitossociológica de um fragmento de caatinga sensu stricto 30 anos após corte raso, Petrolina-PE, Brasil. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 2, p. 67–74, 2011.

KAARTINEN, H. et al. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. **Remote Sensing**, Basel, v. 4, n. 12, p. 950–974, 2012.

LEITE, J. A. N. et al. Análise quantitativa da vegetação lenhosa da Caatinga em Teixeira , PB. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 32, p. 89–100, 2015.

LIBONI, A. P. et al. Relações alométricas da comunidade arbórea de diferentes áreas de uma floresta ombrófila mista do sul do Brasil. **Semina: Ciências Biológicas e da Saúde**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 125–136, 2010.

LIMA JÚNIOR, C. D. et al. Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 102, p. 289–298, 2014.

LIMA, B. G. DE; COELHO, M. D. F. B.; OLIVEIRA, O. F. DE. Caracterização florística de duas áreas de caatinga na região centro-sul do Ceará, Brasil. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 28, n. 2, p. 277–296, 2012.

LUCENA, D. B.; GOMES FILHO, M. F.; SERVAIN, J. Impact evaluation of the extreme climatic events in the pacific and atlantic oceans on the northeast Brazil rainy season. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 26, n. 2, p. 297–312, 2011.

MACEDO, R. C. **Estimativa volumétrica de povoamento clonal de Eucalyptus sp. através de laserscanner aerotranportado**. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

MARANGON, G. P. et al. Modelagem da distribuição diamétrica de espécies lenhosas da caatinga, Semiárido Pernambucano. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 3, p. 863–874, 2016.

MATTOS, P. P. DE et al. Estimativa de crescimento em diâmetro e volume. In: GOMES, L. J. et al. (Eds.). **Pensando a biodiversidade: aroeira (Schinus terebinthifolius RADDI.)**. Aracaju: UFS, 2013. p. 161–177.

MIRANDA, D. L. C. DE; PARO, B. A. V.; COSTA, G. R. Estimativa do volume em árvores de *Hymenaea coubaril* L. e *Trattinnickia burserifolia* Mart. no norte de Mato Grosso. **Pesquisas Agrárias e Ambientais**, Sinop, v. 2, n. 4, p. 219–223, 2014.

MIRANDA, D. L. C.; JUNIOR, V. B.; GOUVEIRA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantio de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia Plena**, São Cristóvão, v. 11, n. 3, p. 1–8, 2015.

MOGNON, F. et al. Alocação e modelagem da biomassa em *Dendrocalamus asper*. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 1, p. 1–10, 2015.

MORAIS, V. A. et al. Influence of diameter measuring height on the adjustment of volume and biomass equations of Cerrado in Minas Gerais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 38, n. 3, p. 230–239, 2014.

MUUKKONEN, P.; HEISKANEN, J. Estimating biomass for boreal forests using ASTER satellite data combined with standwise forest inventory data. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 99, n. 4, p. 434–447, 2005.

OJIMA, R.; MARTINE, G. Resgates sobre população e ambiente: Breve análise da dinâmica democrática e a urbanização nos biomas brasileiros. **Revista Idéias**, Campinas, v. 1, p. 55–70, 2012.

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

PEREIRA JÚNIOR, L. R.; ANDRADE, A. P. DE; ARAÚJO, K. D. Composição florística e fitossociológica de um fragmento de caatinga em monteiro, PB. **Holos**, Natal, v. 6, n. 28, p. 73–87, 2012.

PERNAMBUCO Tridimensional, 2016. Disponível em:
<<http://www.pe3d.pe.gov.br/mapa.php>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

POPESCU, S. C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v. 31, n. 9, p. 646–655, set. 2007.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H. Seeing the trees in the forest : using LiDAR and multispectral data fusion with local filtering and variable window size for estimating tree height. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, Bethesda, v. 70, n. 5, p. 589–604, 2004.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Estimating plot-level tree heights with lidar : local filtering with a canopy-height based variable window size. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 37, p. 71–95, 2002.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; NELSON, R. F. Measuring individual tree crown diameter with LiDAR and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. **Canadian Journal of Remote Sensing**, Ottawa, v. 29, n. 5, p. 564–577, 2003.

POPESCU, S. C.; WYNNE, R. H.; SCRIVANI, J. A. Fusion of small-footprint LiDAR and multispectral data to estimate plot-level volume and biomass in deciduous. **Forest Science**, Bethesda, v. 50, n. 0324, p. 551–565, 2004.

POPESCU, S. C.; ZHAO, K. A voxel-based LiDAR method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 112, n. 3, p. 767–781, 2008.

RATCHUNE, L. C. et al. Estado da arte na quantificação de biomassa em raízes de formações florestais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, New York, v. 23, n. 3, p. 450–462, 2016.

RODAL, M. J. N. et al. Fitossociologia do componente lenhoso de um refúgio vegetacional no município de Buíque, Pernambuco. **Revista Brasileira de Biologia**, Rio de Janeiro, v. 58, n. 3, p. 517–526, 1998.

RODAL, M. J. N.; MARTINS, F. R.; SAMPAIO, E. V. DE S. B. Levantamento quantitativo das plantas lenhosas em trechos de vegetação de Caatinga em Pernambuco. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 21, n. 3, p. 192–205, 2008.

RODRIGUEZ, L. C. E. et al. Inventário florestal com tecnologia laser aerotransportada de plantios de *Eucalyptus* spp no Brasil. **Ambiencia**, Guarapuava, v. 6, p. 67–80, 2010.

SABINO, F. G. DA S.; CUNHA, M. DO C. L.; SANTANA, G. M. Estrutura da vegetação em dois fragmentos de Caatinga antropizada na Paraíba. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 23, n. 4, p. 487–497, 2016.

SAMPAIO, E. V. S. B.; SILVA, G. C. Biomass equations for Brazilian semiarid caatinga plants. **Acta Botanica Brasilica**, Belo Horizonte, v. 19, n. 4, p. 935–943, 2005.

SANQUETTA, C. R. et al. Equações para estimativa do diâmetro de copa para Acácia-negra. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n. 2, p. 192–205, 2014.

SANTANA, S. H. C. DE et al. Análisis de la biomasa de fragmento de bosque por medio de productos LIDAR , en Cataluña – España. **Journal of hyperspectral Remote Sensing**, Recife, v. 6, n. 5, p. 235–249, 2016.

SANTOS, M. de F. de A. V. et al. Diversidade e densidade de espécies vegetais da caatinga com diferentes graus de degradação no município de Floresta, Pernambuco, Brasil. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 60, p. 389 – 402, 2009.

SILVA, G. C.; SAMPAIO, E. V. D. S. B. Biomassas de partes aéreas em plantas da caatinga. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 567–575, 2008.

SILVA, G. F. DA et al. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 341–348, 2012.

SILVA, V. S. D. M. E. et al. Prognose da produção de *Eucalyptus camaldulensis* DEHNH . Pela aplicação de função de distribuição SB de Johnson. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, n. 5, p. 853–863, 2009.

SILVEIRA, P. et al. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 1, p. 185–206, 2008.

SOUZA, A. L. DE et al. Estrutura fitossociológica, estoques de volume, biomassa, carbono e dióxido de carbono em Floresta Estacional Semidecidual. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 169–179, 2012.

SRINIVASAN, S. et al. Multi-temporal terrestrial laser scanning for modeling tree biomass change. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 318, p. 304–317, 2014.

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml#Uw8-EVKYaM8>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

THIERSCH, A. **Eficiência das distribuições diamétricas para prognose da produção de *Eucalyptus camaldulensis***. 1997. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras 1997.

THOMAS, C. et al. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 16, n. 3, p. 319–327, 2006.

TROVÃO, D. M. D. B. M. et al. Variações sazonais de aspectos fisiológicos de espécies da Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 83, p. 307–311, 2007.

VELLOSO, A. L.; SAMPAIO, E. V. S. B.; PAREYN, F. G. C. (2002). **Ecorregiões propostas para o bioma caatinga**, Recife: Associação Plantas do Nordeste, Instituto de Conservação Ambiental The Nature Conservancy do Brasil, 2002. 76 f.

ZANDONÁ, D. F.; LINGNAU, C.; NAKAJIMA, N. Y. Varredura a Laser aerotransportado para estimativa de variáveis dendrométricas. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 36, n. 80, p. 295–306, 2008.

ZHAO, K. et al. Hyperspectral remote sensing of plantbiochemistry using Bayesian model averaging with variable and band selection. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 132, p. 102–119, 2013.

ZHAO, K.; POPESCU, S.; NELSON, R. LiDAR remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 113, n. 1, p. 182–196, 2009.

ZIMBLE, D. A. et al. Characterizing vertical forest structure using small-footprint airborne LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 87, n. 2-3, p. 171–182, 2003.

ZONETE, M. F.; RODRIGUEZ, L. C. E.; PACKALÉN, P. Estimação de parâmetros biométricos de plantios clonais de eucalipto no sul da Bahia: Uma aplicação da tecnologia laser aerotransportada. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 225–235, 2010.