



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

**ANÁLISE DE BIOMASSA FLORESTAL DE *Pinus uncinata* POR MEIO
DE FERRAMENTAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PASSIVO E
ATIVO**

SIDNEY HENRIQUE CAMPELO DE SANTANA

RECIFE

2015

Sidney Henrique Campelo de Santana

**ANÁLISE DE BIOMASSA FLORESTAL DE *Pinus uncinata* POR MEIO DE
FERRAMENTAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PASSIVO E ATIVO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Geografia.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda Abrantes Torres

Recife
2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria do Carmo de Paiva, CRB-4 1291

S232a Santana, Sidney Henrique Campelo de.
Análise da biomassa florestal de *Pinus uncinata* por meio de
ferramentas de sensoriamento remoto passivo e ativo / Sidney Henrique
Campelo de Santana. – Recife: O autor, 2015.
78 f. : il. ; 30 cm.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Fernanda Abrantes Torres.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco,
CFCH. Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2015.
Inclui referências e anexo.

1. Geografia. 2. Florestas. 3. Biomassa florestal. 4. Sensoriamento
remoto. 5. Gestão ambiental. I. Torres, Maria Fernanda Abrantes
(Orientadora). II. Título.

910 CDD (22.ed.)

UFPE (BCFCH2015-130)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS - CFCH
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS - DCG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA - PP GEO



SIDNEY HENRIQUE CAMPELO DE SANTANA

ANÁLISE DE BIOMASSA FLORESTAL DE *Pinus uncinata* POR MEIO DE FERRAMENTAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PASSIVO E ATIVO

Dissertação aprovada, em 31/08/2015, pela comissão examinadora:

Profa. Dra. Maria Fernanda Abrantes Torres
(1ª examinadora – orientadora – PP GEO/DCG/UFPE)

Profa. Dra. Josiclêda Domiciano Galvíncio
(2ª examinadora – PP GEO/DCG/UFPE)

Profa. Dra. Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel
(3ª examinadora – Biologia/UFRPE)

RECIFE – PE
2015

AGRADECIMENTOS

A Deus, aos meus pais, Sérgio e Nora, às minhas avós e a meu irmão Sílvio, por serem os principais responsáveis pelo desenvolvimento de meu caráter e pelo que sou. A meus primos, e tios que me apoiaram.

A meu Tutor na Universidad de Valladolid, Dr. Salvador Hernández por conseguir e disponibilizar o banco de dados, fonte deste trabalho, e a Luis Fernando que me ajudou com as técnicas e apoiou com os dados.

À professora Dra. Maria Fernanda Torres por me orientar nesse trabalho. À professora Dra Josiclêda Galvíncio, por ser principal responsável pelo meu aprendizado com as técnicas de sensoriamento remoto, pela dedicação em muitos outros trabalhos. À professora Dra. Rejane Pimentel pelo apoio, orientações e conselhos.

Ao professor Dr. Ranyére Nobrega por me ajudar com as questões de documentação enquanto me encontrava na Espanha.

A Eduardo Veras, por sempre estar disponível a me auxiliar com as questões burocráticas.

Aos colegas e amigos, em especial Elisabeth Cavalcanti, Pedro Paulo, Andrezza Karla, Iwelton Madson, Amparo Gilces, Tiago Félix, Ítalo Francis e Ygor Cristiano por fazerem parte da minha trajetória acadêmica.

Ao SERGEO, ao CNPq, ao Banco Santander da Espanha, à Universidade Federal de Pernambuco e à Universidad de Valladolid pela estrutura e suporte.

A Lucielle Laurentino, por em nenhum momento medir esforços, e por abdicar de noites de descanso, para apoiar-me, não só neste, mas também em outros trabalhos acadêmicos. Por debater, por confrontar minhas ideias, por me ajudar na busca de ferramentas, fundamental para meu desenvolvimento científico.

*“Ouça conselhos e aceite instruções,
e acabará sendo sábio.”
Provérbios 19:20.*

RESUMO

As florestas têm um papel fundamental no sequestro de carbono da atmosfera. Dessa forma, este trabalho tem como principal objetivo quantificar e analisar a biomassa de um fragmento florestal de *Pinus uncinata* pertencente ao Espaço Natural da Montanha de Alinyà, por meio de ferramentas de sensoriamento remoto. O espaço natural está localizado no município de Figòls y Alinyà, na província Lleida, situada na Catalunha – Espanha. Assim, para realizar este estudo foram selecionadas 7 imagens do sensor TM do Landsat 5 correspondentes aos anos 1984, 2003, 2006, 2008, 2009, 2010 e 2011 com rota 198 e ponto 31. Seguidamente foram trabalhadas as bandas espectrais de cada imagem e calculados a calibração radiométrica, a refletância e os índices de vegetação NDVI e SAVI. Com os dados LiDAR foram gerados os Modelos Digitais de Terreno (MDT) e realizados os cálculos estatísticos pertinentes para calcular a biomassa florestal, a área basal e o teor de carbono. As informações obtidas foram projetadas em mapas. Como resultado, o NDVI mostrou-se importante por proporcionar a análise temporal do comportamento da massa florestal. No entanto, o NDVI e o SAVI tiveram seus resultados prejudicados pela influência dos efeitos topográficos. Os modelos de regressão linear para biomassa, área basal e teor de carbono tiveram uma correlação satisfatória com os dados de inventário para duas das cinco zonas consideradas. Dessa forma, foi possível estimar estas variáveis florestais para a zona de estudo. O cálculo de biomassa florestal pelos dados LiDAR resultaram em 9.138,6 t para uma área de 69,04 ha, enquanto que os cálculos de inventário resultaram em 11.638,4 tn. O Teor de carbono o cálculo com os dados LiDAR resultaram em 5.425,04 t diante de 6.520,18 t resultantes dos cálculos com os dados de inventário. Portanto se pode afirmar que a tecnologia LiDAR traz ao estudo florestal uma série de aplicações necessárias para uma efetiva gestão dos sistemas florestais. Além disso, o LiDAR apresenta vantagens diante dos outros métodos convencionais, em relação à sua precisão, temporalidade e varredura, ainda mais diante da urgência de se obter resultados confiáveis no cenário atual de mudanças climáticas e vulnerabilidade dos ecossistemas.

Palavras-chave: Biomassa florestal. Índices de vegetação. LiDAR.. *Pinus uncinat.*, sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The forests have a vital role in carbon capture from the atmosphere. Thus, this work has as its main objective to quantify and analyze biomass of a forest fragment of a *Pinus uncinata* that belongs to Alinyà Mountain Natural Space, through remote sensing tools. The natural area is located in the County of Figòls y Alinyà, in the Lleida province, located in Catalonia-Spain. In this sense, to conduct this study, 7 images were selected from the Landsat 5 TM sensor corresponding to 1984, 2003, 2006, 2008, 2009, 2010 and 2011 with path 198 and row 31. Subsequently, the spectral bands of each image were manipulated, and then the radiometric calibration, reflectance, and the NDVI and SAVI vegetation indexes were calculated. Using the LiDAR data, the Digital Terrain Models (DTM) were generated, and relevant statistical calculations were made to subsequently calculate the forest biomass, basal area, and carbon content. The information obtained was projected on maps. As a result, the NDVI has supported the study by temporally analyzing the behavior of the forest. However, this index, and even more the SAVI, suffered with the influence of topographic effects. The linear regression models for biomass, basal area, and carbon content had a satisfactory correlation with the inventory data for 2 of the 5 areas considered. In this sense, it was possible to estimate these forest variables for the study area. The calculation of forest biomass by LiDAR data resulted in 9,138.6 ton to an area of 69.04 ha, while the inventory calculations resulted in 11,638.4 ton. For the carbon content, the calculation with the LiDAR data resulted in 5,425.04 ton in comparison with the 6,520 .18 ton resulting from the calculations with the inventory data. Hence, it is safe to say that LiDAR technology brings to the forest study a series of applications that are required for an effective management of forest systems. In addition, the LiDAR presents advantages before other conventional methods, regarding its accuracy, temporality, and range, especially on the urgency of obtaining reliable results in the current scenario of climate change and vulnerability of ecosystems.

Keywords: Forest biomass. LiDAR. *Pinus uncinata*. Remote sensing. Vegetation indexes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Apresentação geral da espécie da árvore <i>Pinus uncinata</i>	21
Figura 2: Visão aérea da Montaña de Alinyà.....	27
Figura 3: Pinhais em Obaga de Companys, Montaña de Alynà.....	29
Figura 4: Abutre preto, Montaña de Alinyà.....	30
Figura 5: Produto cartográfico do Inventário Florestal.....	31
Figura 6: Mapa do Espaço Natural Montaña de Alynà, com os pontos do inventário.....	33
Figura 7: Localização do área de estudo (zona 1a) e as parcelas do inventário... ..	34
Figura 8: Zona 1a.....	35
Figura 9: Visualização da nuvem de pontos LiDAR pelo FugroViwer.....	39
Figura 10: Execução do comando no LasTools por meio do cmd do Windows.. ..	40
Figura 11: Representação cartográfica do cálculo do NDVI na zona de estudo.. ..	45
Figura 12: Média do NDVI ao longo dos anos.....	46
Figura 13: Resultado cartográfico da aplicação do SAVI área de estudo.....	46
Figura 14: Média do SAVI ao longo dos anos.....	47
Figura 15: Modelo Digital de Superfícies da zona 1a.....	48
Figura 16: Modelo Digital de Altura de Vegetação da Zona 1a.....	49
Figura 17: Modelo linear gerado para estimar a biomassa florestal.....	50
Figura 21: Quadrículas e pontos com os dados florestais.....	55
Figura 22: Distribuição da biomassa florestal na zona 1a.....	56
Figura 23: Área basal da zona 1a.....	58
Figura 24: Distribuição do teor de carbono na área de estudo.....	60
Figura 25: Distribuição da biomassa florestal na área de estudo.....	61
Figura 26: Distribuição dos valores de NDVI na área de estudo.....	61

LISTA DE SIGLAS

C – Carbono
CREAF - *Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales*
DAP - Diâmetro à Altura Do Peito
EEA - *European Environmental Agency*
ETRS - *European Terrestrial Reference System 1989*
EVI - *Enhanced Vegetation Index*
FAO - *Food and Agriculture Organization*
FCLP - *Fundació Catalunya-La Pedrera*
GEE - Gases do Efeito Estufa
ICC - *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya*
IDEE - Geoportall da *Infraestructura de Datos Espaciales de España*
IER – Intensivo de eficiência energetic e energia renováveis
IFN3 - *Inventario Forestal Nacional 3*
IGN - *Instituto Geográfico Nacional de España*
IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*
LiDAR - *Light Detection and Ranging*
LtHP - *Low to High Productions*
MDE – Modelo Digital de Elevação
MDHV - *Modelo Digital de Altura de Vegetación*
MDS – Modelo Digital de Superfícies
MDT – Modelo Digital de Terreno
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
ND – Número Digital
NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*
NIR - *Near-Infrared*
NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*
OSGeo - *Open Source Geospatial Foundation*
PNOA - Plano Nacional de Ortografia Aérea
RVI - *Ratio Vegetation Index*
SAVI - *Soil-Adjusted Vegetation Index*
TM - *Thematic Mapper*
EU - *European Union*
UTM - *Universal Transverse Mercator*
UV-B - Unidad Técnica de Masa
VIS - Visível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	O clima no planeta	15
2.2	Mudanças climáticas e as florestas	17
2.2.1	As coníferas	18
2.3	A Biomassa florestal	20
2.4	O Sensoriamento remoto no estudo da vegetação	24
2.4.1	Sensoriamento remoto e o teor de carbono	26
2.5	A tecnologia LiDAR	27
3	O ESPAÇO NATURAL DA MONTANHA DE ALINYÀ	30
4	MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1	Dados do inventário	33
4.2	Área de estudo	35
4.3	Aquisição e processamento dos dados matriciais	37
4.3.1	Cálculo de radiância	38
4.3.2	Cálculo de reflectância	38
4.4	Índices de vegetação	38
4.4.1	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	39
4.4.2	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo	39
4.4.3	Raster para ascii	39
4.5	Os dados LiDAR	40
4.6	Modelos Digitais de Terreno	42
4.7	Dados do Inventário vs LiDAR	43
4.7.1	Função <i>ClipData</i>	43
4.7.2	Função <i>Cloudmetrics</i>	44
4.8	Construção dos modelos lineares e das equações alométricas	44
4.9	Aplicação das equações nas variáveis do LiDAR	45
4.9.1	Função <i>Gridmetrics</i>	45
4.10	Comparação da Biomassa florestal com o NDVI	46
4.11	Mapeamento e Layout	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1	Índices de vegetação	47

5.2 Modelos Digitais de Terreno	50
5.2.1 Modelo Digital de Superfícies	50
5.2.2 Modelo de dossel	51
5.3 Cálculos dos modelos estatísticos baseados nos dados LiDAR	52
5.4 Estimativa das variáveis florestais	56
5.4.1 Área basal	57
5.4.2 Biomassa Florestal.....	58
5.4.3 Teor de Carbono.....	60
5.5 Biomassa florestal vs NDVI	62
6 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	65
ANEXOS	76

1 INTRODUÇÃO

A vegetação arbórea é responsável pela absorção de 70% do carbono acumulado na vegetação mundial (BRAVO *et al.* 2002). Nesse sentido, as florestas mundiais compostas por vegetação arbórea conseguem armazenar cerca de 289 gigatoneladas de carbono apenas em sua biomassa, desempenhando, dessa forma, um papel decisivo no equilíbrio mundial do carbono e possuindo um importante potencial para mitigação das mudanças climáticas (FAO, 2010).

Todavia, na maior parte dos países europeus e América do Norte, o volume da madeira aproveitada anualmente é menor que o crescimento anual das florestas (FAO, 2010), sendo necessárias atualmente políticas públicas que promovam o acompanhamento das taxas de armazenamento de carbono nas florestas, tais como o protocolo de Kioto, sinalizando a necessidade de uma orientação para gestão ambiental das florestas objetivando a mitigação das mudanças climáticas (CANADELL e RAUPACH, 2011).

O impacto ambiental das mudanças climáticas se manifesta de formas distintas de acordo com as diferentes regiões geográficas. Dessa forma, seus efeitos sobre os biomas podem se intensificar conforme o aumento nos níveis de temperatura, as variações no nível de irradiância e raios UV-B, bem como com a quantidade e os padrões espaciais de precipitação e umidade (NETHERER; SCHOPF, 2010). O IV relatório de avaliação do IPCC, aprovado no primeiro semestre de 2007, destaca que, entre os ecossistemas terrestres, “...os sistemas do tipo mediterrâneo [assim como o bioma da caatinga] estão entre os mais vulneráveis às mudanças climáticas do mundo e sofrerão fortes impactos” (IPCC, 2007).

A elevação das temperaturas médias se apresenta como um fator determinante que explica as mudanças na distribuição de plantas e animais, no qual se vem observando nos últimos tempos. Neste contexto, as florestas são particularmente sensíveis às variações do clima, pois, com um tempo de vida longo, as árvores são incapacitadas de se adaptarem rapidamente às mudanças ambientais (LINDNER *et al.*, 2010).

A fixação de carbono na biomassa arbórea dos sistemas florestais da Espanha foi quantificada por Montero *et al.* (2005), além dos estudos realizados por Sánchez Peña; Martínez Saavedra (2001) e Brown (2002), os quais tem como base os dados dos inventários florestais nacionais, que oferecem subsídios para se estimar a biomassa desses bosques.

Estudo realizado por OSE (2011) salienta que o carbono acumulado em sistemas florestais varia em grande medida de acordo com as espécies, Montero (2008) também

salienta que algumas espécies como o *Pinus sylvestris* T., podem sofrer maiores consequências num cenário de mudanças ambientais. Autores como López; Camacho (2010) numa simulação para um cenário de mudança climática simulada para 2050 constataram que em algumas espécies haverá uma diminuição da área fitoclimática potencial. Outros estudos realizados, a partir de sensoriamento remoto ativo, retratam a ocupação da espécie *Pinus sylvestris* em regiões ecológicas e socialmente similares (CUASANTE; GARCÍA, 2009)

Nas últimas décadas, novas ferramentas de sensoriamento remoto têm ganhado popularidade por adquirir informação espacialmente contínua sobre a disposição geográfica dos recursos florestais (BOYD; DANSON, 2005). Nesse sentido, o sensoriamento remoto assume maior importância a partir do momento em que os custos atrelados ao inventário e a necessidade de seguimento das florestas são altos (HOLMGREN; THURESSON, 1998).

Entre tais ferramentas se encontra o *Light Detection and Ranging* (LiDAR), ou, também conhecido como *Laser Scanner*. A partir da emissão de pulsos laser esta ferramenta mede o tempo de retorno para estimar diretamente a altura e a estrutura das florestas (DUBAYAH; DRAKE, 2000; LEFSKY *et al.* 2002). Dessa forma, com os dados LiDAR é possível fazer uma leitura das estruturas florestais, como volume das copas das árvores, distribuição vertical do dossel, diversidade florestal, quantidade de biomassa sobre o solo coberto pela vegetação, estudos sobre erosão e sedimentação costeira, entre outros. Estando assim, entre umas das técnicas aerotransportadas mais precisas para adquirir informação de posição de qualquer objeto sobre a superfície da Terra (RENGIFO; PUENTES, 2007). Além disso, de acordo com Reutebuch *et al.* (2005) e Mallet; Bretar (2009) os dados LiDAR podem oferecer uma alta densidade de amostragem com precisão geométrica excelente.

A tecnologia LiDAR, sobretudo, fornece uma gama de dados indiretos sobre os elementos terrestre que são utilizados em modelos estatísticos.

Na perspectiva da Geografia Quantitativa, é preciso construir modelos a serem utilizados na análise dos sistemas geográficos; estes modelos, construídos de forma teórica, devem ser verificados e validados com dados de campo a partir de técnicas estatísticas (CHORLEY; HAGGETT, 1967). Um modelo matemático tem sido definido como uma “reunião de conceitos na forma de equação matemática, que retrata o conhecimento de fenômenos naturais” (CONNOLLY, 1998 *apud* PRADO, 2005).

Sobre essa matematização da Ciência Geográfica, defendida pela Geografia Quantitativa, Santos (2002) diz que “o uso de técnicas estatísticas, se corretamente utilizadas, permite uma maior precisão, pois os problemas práticos e metodológicos da geografia são de tal natureza que a utilização das técnicas estatísticas é adequada para exercer uma forte

atração”. Nesse contexto, o estudo dos padrões de distribuição espacial dos fenômenos (eventos pontuais, áreas e redes) passa a formar uma base para estudos quantitativos do espaço em que as tecnologias de detecção remota e processamento digital de imagens têm facilitado enormemente as representações da arquitetura da paisagem.

Deste modo, este estudo foi conduzido em um fragmento de floresta no Espaço Natural da Montanha de Alinyà, que se caracteriza por apresentar uma diversidade paisagística, florística e faunística particular, contendo massas florestais de grande interesse ambiental, como potenciais sumidouros de carbono. Uma destas massas corresponde a um fragmento florestal de *Pinus uncinata*, o qual foi selecionado como objeto de estudo para este trabalho.

A necessidade do trabalho é justificada pelo potencial da técnica, que leva em consideração informações tridimensionais, com precisão dos dados maior do que o Radar e que não sofrem com o efeito da atmosfera (como ocorre com sensores orbitais), fornecendo dados mais específicos sobre os elementos terrestres que poderão servir como base para estudos acerca da modificação nos padrões vegetacionais de determinadas áreas.

Portanto, o objetivo deste estudo consiste em analisar a biomassa florestal de fragmento de bosque de *Pinus uncinata*, pertencente ao Espaço Natural da Montanha de Alinyà, utilizando ferramentas de LiDAR.

Destarte, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Fazer análise espaço-temporal do fragmento florestal por meio dos índices de vegetação;
- Determinar parâmetros florestais dos dados LiDAR;
- Determinar equações para estimar a área basal, biomassa florestal e teor de carbono da área;
- Estimar a área basal, a biomassa florestal e o teor de carbono total da zona;
- Comparar a biomassa florestal estimada pelos dados LiDAR com o NDVI da zona.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O clima no planeta

O clima é a principal preocupação mundial atual e muito mudou desde que as concentrações de gases de efeito estufa (GEE), passando a alarmar a comunidade científica. Nesse contexto, o papel das florestas vem sendo amplamente questionado e debatido – as emissões de gases de efeito estufa, com origem no desmatamento e na agropecuária perfazem no mundo todo cerca de 20% do total de emissões (AMAZONAS, 2009).

O contexto de Mudança do clima, baseado naquele definido pelo IPCC, que a qualquer mudança no clima ocorrida ao longo do tempo, devida à variabilidade natural ou decorrente da atividade humana. Esse uso difere do da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, em que o termo mudança do clima se refere a uma mudança no clima que seja atribuída direta ou indiretamente à atividade humana, alterando a composição da atmosfera global, e seja adicional à variabilidade natural do clima observada ao longo de períodos comparáveis de tempo (IPCC, 2007).

Sobre a ótica geográfica estudar o clima possui uma conotação antropocêntrica, havendo a relação com a meteorologia, mas procura estabelecer uma relação sociedade-natureza (JESUS, 2008). Aproximando o conceito de Clima do próprio objeto da Geografia definido por Frederick Ratzel (1844-1904) como sendo estudo das influências das condições naturais sobre a humanidade.

Nos estudos de Monteiro (1991) encontramos as definições desenvolvidas por Julius Hann em 1882, onde define que o “clima é o conjunto de fenômenos meteorológicos que caracterizam o estado médio da atmosfera sobre determinado lugar da superfície terrestre”; e por Köppen em 1906, apresenta o “clima como o estado médio da atmosfera e o processo ordinário de tempo, em dado lugar, considerando-se que o tempo meteorológico se altera, porém, o clima se mantém constante”; onde fica explícita a noção de média em suas concepções climáticas, demonstrando a presença do discurso da climatologia separatista (BARROS, 2009). Para Max Sorre (1957), o clima é “o ambiente atmosférico constituído pela série de estados da atmosfera sobre um lugar em sua sucessão habitual” (SORRE, 1951; FERREIRA, 2012). Max Sorre baseasse nos avanços da meteorologia dinâmica, além de realizar uma revisão do conceito de Hann, mantendo a referência à característica local do complexo climático (BARROS, 2009). Acima de tudo era geógrafo humano, que acabou por criar, um paradigma para o estudo geográfico do clima, partindo também da crítica aos valores médios e da análise separativa dos elementos do clima (JESUS, 2008). Outra

definição mais genérica, traduz o clima pelo conjunto de todos os estados que a atmosfera pode ter num determinado local, durante uma larga escala de tempo, definido em 30 anos (I. M., 2009).

Climatologia, que nasce baseada nos estudos da Meteorologia, encontra-se dentro do campo da geografia física, tendo como objeto de estudo os fenômenos da atmosfera em contato com a superfície terrestre e sua distribuição espacial e dessa forma relaciona-se com outras áreas da Geografia Física, da Geografia Humana. (FERREIRA, 2012). Para a climatologia o tempo, diferentemente do clima, o tempo seria é uma combinação passageira, efêmera, de curta duração dos fenômenos atmosféricos. (BARROS, 2009)

Mas é com a revolução da Geografia Física, com o Modelo Geossistêmico, que a Climatologia passa a incorporar o método que permite analisar as interações entre a atmosfera, biosfera e solos, numa macroescala ou mesoescala (FERREIRA, 2012).

As alterações do clima podem ser fruto de processos naturais internos e/ou externos, ou provocadas pela ação humana, a exemplo do impacto sobre alteração da composição da atmosfera e do uso do solo. As alterações climáticas podem-se definir como uma variação estatisticamente significativa do estado médio das variáveis que definem o clima, isto durante um longo período de tempo compreendido entre décadas ou mesmo séculos (IPCC, 2001). O autor Tilio Neto (2010), em uma contexto mais amplo, trata de mudanças climáticas como sendo as alterações no sistema climático terrestre, que podem advir do aquecimento global, de alterações na circulação oceânica ou de outros fatores.

As mudanças climáticas são acompanhadas pelo IPCC e descritas através de relatórios servem de base para as políticas globais. Os modelos e relatórios globais mostram que, entre 1900 e 2100, a temperatura global pode aquecer entre 1.4 e 5.8°C, o que representa um aquecimento mais rápido do que aquele detectado no século XX e que, aparentemente, não possui precedentes durante, pelo menos, os últimos 10.000 anos (IPCC, 2007).

As previsões para os efeitos do aquecimento global na temperatura do ar até o final do século XXI é de 2°C e 8,6°C, em relação à temperatura média do período de 1961 a 1990 (MIRANDA *et al.*, 2006). Para Hansen *et al.* (2006) a temperatura média da superfície do planeta tem aumentado em 0,2°C por década nos últimos 30 anos. Esse aquecimento recente da atmosfera está afetando os sistemas biológicos terrestres, ocasionando mudanças na estrutura e função dos ecossistemas em decorrência da elevação da temperatura (MANTYKA-PRINGLE *et al.*, 2012).

As alterações climáticas, sobretudo o aumento da concentração de CO₂ atmosférico e da temperatura do ar, têm repercussões nos processos de fotossíntese, fotorrespiração e de

transpiração das plantas. Por esta razão, as alterações climáticas afetam o crescimento das plantas, o uso da água e de nutrientes do solo (MORISON e GIFFORD, 1984).

Entre 2006 e 2010, aproximadamente dois milhões de hectares de florestas foram atingidas por incêndios na região do Mediterrâneo. Sem medidas de prevenção adequadas às condições climáticas extremas podem causar incêndios catastróficos, afetando diretamente as populações e as florestas (FAO, 2013).

Considerando a importância das florestas no cenário das mudanças climáticas, se torna extremamente importante que sejam realizadas estimativas de biomassa florestal, conforme os trabalhos de Moroni (2011) e Withers *et al.* (2015), que apoiam as decisões sobre o gestão e uso das florestas, além de contribuir para o quantificação de sequestro de carbono.

2.2 Mudanças climáticas e as florestas

Conservação das Massas florestais desempenha, sem dúvida, um papel fundamental na estabilização das concentrações dos gases de efeito estufa e na minimização dos efeitos das mudanças climáticas (AMAZONAS, 2009). O aumento da compreensão sobre as mudanças climáticas e seus efeitos nos sistemas ecológicos permite distinguir-se os efeitos em curto prazo dos de longo prazo (YOUNG *et al.*, 2005). A mitigação das mudanças climáticas globais envolve a realização de uma série de atividades, voltadas a modificar o funcionamento de uma infraestrutura social altamente poluente.

A União Europeia (UE), dada a sua elevada dependência dos combustíveis fósseis e cumprimento do Protocolo de Quioto, vem reforçando as políticas de sustentabilidade e uso de energias renováveis. Através da publicação da Diretiva 2001/77/CE, a UE reconhece a necessidade de promover, como medida prioritária, as Fontes de Energia Renováveis (FER), estabelecendo aos estados-membros metas indicativas de produção de energia, através destas fontes de energia renováveis, permitindo assim o desenvolvimento sustentável e a proteção do ambiente (GÓMEZ, 2015).

No caso da Espanha, uma das iniciativas foi à publicação em 2005 do Plano de Energias Renováveis de Espanha 2005-2010, que reunia apresentava uma política energética espanhola na área das energias renováveis, tendo a Biomassa como foco das ações. No caso da Comunidade Autónoma de Catalunha, o lançamento do Plano da Energia da Catalunha 2006-2015, que também inclui um Plano de Energias Renováveis, apostando no aproveitamento térmico da biomassa florestal impulsionando instalações em sectores de grande procura térmica, nomeadamente industrial e terciário. A previsão para esse de ano de 2015 de

consumo de energia primária, proveniente da biomassa lenhosa (agrícola e florestal) no cenário IER, seria de 278,6 Ktep contra 93 Ktep (Kilo tonelada equivalente de petróleo) em 2003 para a toda comunidade autônoma (PROJETO ENERSILVA, 2007).

Em relação ao setor Florestal, as florestas da Europa são as mais controladas e exemplo de sustentabilidade no setor, com um crescimento florestal e o mais forte mecanismo regional de política florestal existente. O ministério de Agricultura, Alimento e Meio Ambiente da Espanha apresentou no relatório de impactos, vulnerabilidade e adaptação às mudanças climáticas revelaram que inúmeros impactos no sistema florestal com as: i. redução da disponibilidade hídrica, ii. aumento dos incêndios florestais, iii. aumentos de chuvas torrenciais e processos erosivos; iv. maior frequência de vendavais; v. expansão das pragas e enfermidades e vi. Modificação na fenologia e fisiologia das espécies arbóreas (ARAÚJO, 2011). Esses impactos provocam vulnerabilidade das massas florestais.

Considerando que a Espanha possui uma superfície total de 50.601.900 ha, das quais destinadas a usos florestais são cerca de 55% (27.872,29 ha) segundo o Anuário de Estadística Florestal (2007) e 48% segundo Ministério de Meio Ambiente, Meio Rural e Marino da Espanha (2015). As diferenças de porcentagem se dão em função da metodologia de cálculo utilizada. Cerca de 35% de superfície florestal de são de propriedade públicas e as demais, de privadas. Em termos gerais 46% da superfície florestal estão ocupadas por frondosas e 35% por Coníferas, e as demais são mesclas das duas massas (MARM, 2009).

2.2.1 As coníferas

Dentre as variedade de coníferas encontradas na Espanha destacamos o *Pinus uncinata*, *Pinus montana*, *Pinus sanguinea*. No caso do *Pinus uncinata*, sua nomenclatura deriva do Latín *uncinatus* (ganchudo) que deriva de *uncus* (ganchos), também conhecido como Pinheiro montanhês. O *Pinus sylvestris* T., por exemplo, é um pino que ocupa uma média de 1.280.000 ha do território espanhol (MONTERO *et al.* 2008) podendo sofrer maiores consequências com as mudanças ambientais (Figura 1).

Figura 1: Apresentação geral da espécie *Pinus uncinata*.



Fonte: MAGRAMA (2015).

As massas desse pino são dominantes sobre toda a parte central da Cordilheira Pirenaica, com exceção apenas dos extremos atlântico e mediterrâneo que são menos continentais. É sobre os Pirineus que se localiza mais de 90% de representação total da espécie em território espanhol. No Sistema Ibérico o *Pinus uncinata* forma populações relictas geralmente mescladas com *Pinus sylvestris*. Estas massas representam um dos mais genuínos bosques subalpinos ibéricos, o que explica que apareçam de forma predominante na região biogeográfica Alpina (CAMARERO, 2009).

Constata-se em diversos estudos que o carbono acumulado em sistemas florestais varia, de acordo com as espécies, por exemplo, os eucaliptos e os pinos são as árvores que apresentam as maiores taxas de absorção de carbono. Dessa maneira, estes dois apresentam uma média de 1,2 t.ha.ano, demonstrando o potencial dos bosques na Espanha (OSE, 2011).

Um estudo realizado por López; Camacho (2010) mostra que em um cenário para 2050 que a superfície ocupada pelo *Pinus sylvestris* sofrerá uma diminuição da área fitoclimática potencial dos atuais 8.444.700 ha a 1.269.100 ha em condições climáticas correspondentes a esse cenário. Na metade do sul da Espanha, segundo os autores, a situação seria, todavia, mais grave, onde a espécie desapareceria praticamente do conjunto de serras béticas e de uma parte muito importante do Sistema Central.

Das massas localizadas na parte mediterrânea, cerca de 7% necessitam de monitoramento quanto à estrutura e dinâmica, dado as condições mediterrâneas, e porque são onde geralmente se formam populações fragmentadas ou relictas (CAMARERO, 2009).

O *Pinus uncinata* forma a maioria dos bosques subalpinos e limites altitudinais da zona dos Pirineus (CANTEGREL, 1983). A temperatura é o principal fator limitante do crescimento da espécie. Se estima que a temperatura média anual de zonas de pinhais de *Pinus uncinata* está próxima a 5 °C, ainda que os dados climatológicos das montanhas são escassos, de baixa confiança e de grande variabilidade espacial (CAMARERO, 2009). Nas zonas dos Pirineus as massas estão limitadas a temperatura, mas também pelas variáveis associadas à precipitação, o que causa uma breve estação de crescimento predominantemente das coníferas frente às frondosas em zonas de clima continental (TARDIF *et al.*, 2003).

Os limites altitudinais dos bosques são considerados como monitor ecológico dos efeitos do aumento de temperaturas sobre o crescimento, regeneração e dinâmica dos bosques subalpinos. Suas plântulas resistem bem às geladas, até mesmo com pouca proteção nival (FREY, 1983). Outros fatores relevantes que afetam a dinâmica das massas do *Pinus uncinata* são a topografia e a geomorfologia, que determinam em parte o papel protetor de muitos dos bosques em zonas de elevada erosão. (CAMARERO, 2009).

No começo do Holoceno, o *Pinus uncinata* poderia ter estado presente em zonas montanhosas da Cordilheira Cantábrica também na Espanha (RAMIL-REGO *et al.*, 1998). Durante o Tardiglacial, de 13.000 a 12.000 anos atrás, o limite do bosque se situava a 1.700 metros nos Pirineus Centrais Espanhóis (MONTSERRAT, 1992). Essas mudanças paleontológicas estavam unidas com a mudança do clima e a mudança no regime térmico.

2.3. A Biomassa florestal

A Biomassa é a quantidade, em massa, de material de origem biológica, viva ou morta, animal ou vegetal (SANQUETTA; BALBINOT, 2004) e está relacionada à produtividade primária líquida que um ecossistema tem a capacidade de produzir (ZHAO; RUNNING, 2010). Contudo, a biomassa florestal significa toda a biomassa, matéria de origem biológica viva ou morta, existente na floresta ou apenas na sua fração arbórea (SANQUETTA, 2002).

De acordo com IPCC (2003), as categorias de biomassa são as seguintes:

- (i) Biomassa viva acima do solo (*above-ground biomass*): toda a biomassa aérea acima do nível do solo incluindo tronco, toco, galhos, casca, sementes e folhas;
- (ii) Biomassa de raízes (*below-ground biomass*): toda a biomassa de raízes vivas, raízes finas com diâmetro de base menor do que 2 mm são excluídas porque não são bem separadas, empiricamente, da matéria orgânica do solo ou da serapilheira fina; e

(iii) Biomassa morta ou necromassa (*dead wood biomass*): toda a biomassa lenhosa não viva, não contida na serapilheira fina, seja em pé ou no chão ou, ainda, no solo.

As florestas são consideradas as maiores acumuladoras de biomassa do planeta. A quantificação da biomassa é um parâmetro ecológico fundamental para se estimar e avaliar o potencial das mudanças climáticas e o balanço carbono global (BOMBELLI *et al.*, 2009). Segundo Sanquetta (2002), o conhecimento dos teores de carbono presente na floresta é de suma importância para se quantificar o teor de carbono, quando estimados a partir dos valores de biomassa florestal. Contudo, os teores de carbono presentes na floresta possuem ampla variabilidade entre espécies e dentre as mesmas, pois os teores são distintos para amadeira, galhos, casca e raízes (REZENDE *et al.*, 2001).

Assim, medir a Biomassa Florestal é fundamental para a avaliação de um ecossistema, na análise da produtividade, conversão de energia, ciclagem de nutrientes, absorção e armazenagem de energia solar (SOARES *et al.*, 2006). Nas quantificações oriundas dos estudos de biomassa florestal podem-se incluir as de ciclagem de nutrientes, além da quantificação para fins energéticos, dando base a informativas para estudos sobre sequestro de carbono. Os estudos nessa área são de grande importância para a tomada de decisões no manejo dos recursos florestais e da própria visão sobre as florestas (TELLER, 1988, PÁSCOA *et al.*, 2004).

Dessa forma, a floresta pode agir como sumidouro, pois as árvores absorvem carbono durante a fotossíntese e estocam o excesso na forma de biomassa (LEWIS *et al.* 2009). Porém, também podem ser fonte de carbono, devido à diminuição da produtividade florestal, aumento nas taxas de mortalidade decorrentes do aumento da temperatura e da severidade das secas, devastação (VAN DER WARF *et al.*, 2009).

O teor de carbono refere-se tanto à biomassa acima quanto a abaixo do solo, sendo assim é necessário quantificar a biomassa de cada componente da vegetação (SILVEIRA *et al.*, 2008). A quantificação de biomassa florestal divide-se em métodos diretos, aqueles aplicados para áreas de pequenas extensões, divididos entre as técnicas gravimétricas e volumétricas, e os indiretos, geralmente utilizados para grandes áreas (GONZALEZ *et al.*, 2010).

Os métodos diretos (destrutivos) significam uma medição real feita diretamente da biomassa florestal, ainda consiste na derrubada e pesagem de todas as árvores que ocorrem em parcelas fixas, fornecendo estimativas (BROWN *et al.*, 1989). Um exemplo de técnica é a pesagem de um fuste inteiro por meio de um dinamômetro ou uma balança.

Quanto ao método indireto, consiste em correlacionar dados de biomassa aérea com alguma variável de fácil obtenção e que não requeira a destruição do material vegetal. As estimativas podem ser feitas por meio de relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões de dados provenientes de inventários florestais ou por dados de sensoriamento remoto (ANTIN *et al.*, 2013; PICARD, 2015; LI WANG, 2015 e TEMESGEN *et al.*, 2015). Inventários florestais no Brasil também são usados como ponto de partida para estimar a biomassa aérea nas florestas (CASTILHO *et al.*, 2006; ALVES *et al.*, 2010).

Em se tratando de Inventários florestais, como definição o conjunto de procedimentos que permitem caracterizar uma determinada área florestal, tendo em vista um determinado objetivo, e ainda é considerado como “censo” das árvores presentes em uma área demarcada (AMAZONAS, 2009). Segundo Shaw (2014), a maioria das informações sobre uma dada área florestal é obtida através do inventário dos seus recursos.

Os países pioneiros na implantação inventários nacionais foram Noruega, Finlândia e Suécia, em 1919, 1921 e 1923, respectivamente, e, desde então, repetido periodicamente. Antes do primeiro inventário da Suécia, as informações disponíveis eram consideradas incertas e temia-se que os recursos florestais estivessem decrescendo. O levantamento mostrou que a área florestal real era maior que a estimada e o estoque de crescimento, bem como o incremento, eram consideravelmente maiores do que se pensava (BENGTSSON, 1978). Os primeiros inventários florestais ainda eram apoiados sob o contexto da gestão florestal e da produção de madeira e descreviam com algum detalhe as árvores. No advento da silvicultura, entretanto, baseado na ecologia, não basta caracterizar as árvores, mas também o sub-bosque, o solo, os recursos não lenhosos, entre outros (Quadro 1).

Quadro 1 - Evolução das necessidades de informações para efeito de gestão florestal.

< ANOS 50	ANOS 60	ANOS 70	ANOS 80	ANOS 90	ANOS 2000>
Lenho	Lenho	Lenho	Lenho	Lenho	Lenho
	Recursos múltiplos	Recursos múltiplos	Recursos múltiplos	Recursos múltiplos	Recursos múltiplos
		Biomassa	Biomassa	Biomassa	Biomassa
			Stocks de carbono	Stocks de carbono	Stocks de carbono
				Biodiversidade produtos não-lenhosos	Biodiversidade produtos não-lenhosos
					Outros usos do solo?

Fonte: Adaptado de Lund e Smith (1997).

Inventários florestais nacionais na Europa são amplamente utilizados, fornecendo bases para a definição de políticas florestais, e para a elaboração de planos para o desenvolvimento e uso das florestas (MONTERO *et al.*, 2004). No caso da Espanha o primeiro inventário florestal nacional da Espanha foi realizado no período 1965-1974, o segundo inventário nacional, no período 1985 a 1994, e seria repetido de dez em dez anos. Em função da demanda por dados que possibilitassem formular políticas florestais pela administração do setor e ainda fomento da indústria florestal. As informações encontradas serviam ao manejo e monitoramento dos recursos florestais a nível nacional, provincial e por comarca, incluindo tabelas e mapas da área florestal, estoque de crescimento, incremento, exploração e estimativa da produção potencial dos recursos florestais (ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, 2014). Hoje inventariação florestal da Espanha completa 50 anos e já passa do seu terceiro inventário (MAGRAMA, 2015).

Na Catalunha, uma das mais importantes comunidades autônomas Espanholas, se encontra outro exemplo de inventariado florestal, o Inventario Ecológico e Florestal de Catalunha (IEFC) elaborado em concomitância com o Terceiro Inventario Nacional Espanhol. O inventário aporta novidades, tanto nas variáveis da amostragem (idade, e crescimento das árvores, concentração de nutrientes nas frações aéreas, estrutura e composição do estrato arbustivo) como nos métodos de ajuste empregados. Métodos que, considerando a significação estatística, resgatam a essência biológica das relações e aplicam em expressões, como regressões alométricas (HYDE *et al.*, 2007; KIM, *et al.*, 2009; ZHAO *et al.*, 2009; POPESCU *et al.*, 2011; MOSSELER, 2014).

Neste sentido, estudos que promovem maior conhecimento acerca da quantidade de biomassa e carbono estocado em diferentes estágios sucessionais são de grande importância, pois contribuem para o desenvolvimento sustentável e a mitigação global da intensificação do efeito-estufa (RIBEIRO *et al.*, 2010). Em alguns dos trabalhos que quantificam biomassa florestal, modelos de estimação foram desenvolvidos e aplicados. Dentre eles estão os de Ratuchne (2010) e ajustados por Mognon (2011) e Foody *et al.* (2001). Algumas ferramentas, como alguns *softwares* são fundamentais para facilitar esse processo e viabilizar o acesso às estatísticas e modelagens do setor florestal, incluindo as modelagens econômicas e de balanço de carbono nas florestas (NIJNIK, 2005, AMARAL *et al.*, 2005, ALDWIN; MATTHEWS, 2005; MEDINA *et al.*, 2005).

2.4. O Sensoriamento remoto no estudo da vegetação

Através do uso das tecnologias de comunicação e de sensoriamento remoto é possível problematizar, estudar, realizar diversos trabalhos práticos de conteúdos específicos de geografia e de outras ciências na área ambiental, relacionando ainda temas ligados ao meio ambiente, favorecendo aos estudantes e a sociedade em geral, numa relação mais harmoniosa com o espaço geográfico.

Dentro das várias definições para sensoriamento remoto, a NASA coloca que o é uma técnica de obtenção de informações sobre um objeto, uma área ou fenômeno no planeta Terra, sem que haja contato físico com o mesmo. Atualmente essas informações são obtidas através de sensores acoplados em satélites que geram imagens. Portanto, o sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens e outros tipos de dados da superfície terrestre através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície (NASA, 2015).

As técnicas de sensoriamento remoto têm papel fundamental no entendimento sobre a dinâmica das transformações da paisagem, permitindo monitorar o uso e cobertura da terra (BATISTELLA; MORAN, 2007). Elas se fundamentam em um processo de interação entre a Radiação Eletromagnética e os diferentes objetos que se pretende estudar. A aplicação dessas técnicas é viabilizada através do cumprimento de diversas etapas que incluem a interação em si, caracterizada principalmente pelo fenômeno de reflexão da radiação, a coleta de dados e seu registro através de um sensor e a análise desses dados com o objetivo de extrair as informações pretendidas de um determinado objeto (PONZONI, 2009).

Assim, de acordo com Novo (1995), pelo princípio da conservação da energia, quando a radiação eletromagnética incide sobre a superfície de um material, parte dela será refletida por esta superfície, parte será absorvida e parte poderá ser transmitida, variando de acordo com a matéria constituinte do objeto. A junção dos três componentes - Reflectância, Absorção e Transparência – e a variação de suas respostas formam as imagens. A energia refletida pode se manifestar em várias direções e comprimentos de onda distinguidos no que se conhece como “faixa do espectro”, isto é, determinados intervalos de comprimentos de onda recebem determinadas classificações, por exemplo: compreende-se que os comprimentos de onda correspondente a cerca de $0,4\mu\text{m}$ a $0,7\mu\text{m}$, se enquadra na faixa do visível, ou seja tudo que é perceptível ao olho humano, a luz. De $0,7\mu\text{m}$ a $1,3\mu\text{m}$ corresponde ao Infravermelho próximo, e assim por diante.

No que diz respeito à vegetação, os diferentes níveis de reflectância por comprimento de onda possibilitam análises da biomassa vegetal, da fisionomia, dos ciclos fenológicos, até

mesmo distinguir a tipologia vegetação. Sendo assim, o sensoriamento remoto aplicado à vegetação propicia monitoramentos temporais e espaciais do seu comportamento, possibilitando e complementando estudos que trabalham com áreas agrícolas, biomas, reservas ecológicas, áreas vulneráveis, assim como, resquícios de mata em áreas urbanas (JENSEN, 2009; PONZONI, 2009).

O intuito fundamental de se estudar vegetação envolvendo a aplicação das técnicas de sensoriamento remoto, segundo Ponzoni (2009), tem como princípio a compreensão da “aparência” que uma determinada cobertura vegetal assume em um dado produto de sensoriamento remoto, a qual é fruto de um processo complexo que envolve muitos parâmetros e fatores ambientais.

A assinatura espectral da vegetação, considerada em estudos, tem como fator principal as atividades fotossintéticas e os níveis pigmentares, o que Jensen (2009) define como “Principais fatores que controlam a reflectância foliar”.

Quanto ao nível orbital, Ponzoni (2009) aborda em sua obra os diversos sensores de estudos meteorológicos e de recursos naturais incluindo, naturalmente, a vegetação. Dentre tais sensores, se encontra a série Landsat, na qual o sensor TM do Landsat 5 é o um dos mais bem sucedidos, pois essa missão estreou em 1984 e seus dados foram utilizados até 2005. Contrapondo, no entanto, as ideias deste autor, pode-se afirmar que, mesmo o sensor TM não apostando tanta precisão em seus resultados, seus produtos ainda são bastante utilizados no que diz respeito ao estudo da vegetação. As bandas mais utilizadas nos estudos da vegetação são as bandas 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo).

Com utilização de dados gerados a partir de imagens de satélite é possível analisar a configuração dos fragmentos florestais, além de outras coberturas da terra, através de métricas específicas. As métricas mais comuns são: o número de polígonos (fragmentos florestais), o tamanho médio, a forma e a conectividade dos polígonos de floresta (BATISTELLA *et al.*, 2002; METZGER, 2003). Ademais, foram desenvolvidas técnicas de realce da vegetação, dentre as quais se encontram a construção dos índices de vegetação.

Segundo Ponzoni; Shimabukuro (2009), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, o NDVI, é um método importante para o monitoramento da vegetação, utilizado para elaborar perfis estacionais e temporais a respeito de seu comportamento. De acordo com Epiphanyo *et al.* (1996), a vegetação é um objetivo complexo do sensoriamento remoto, apresentando uma série de elementos relacionados a ela que influem em seu comportamento espectral. Por este motivo surgiu a necessidade de criar-se modelos que amenizem a influência destes elementos em sua reflectância. Desta forma, para corrigir as influências

externas sobre a vegetação, pesquisadores como Rouse *et al.* (1974), Huete (1998), Allen *et al.* (2002) realizaram uma série de combinações entre intervalos da faixa espectral da vegetação, de maneira que acentuasse a presença vegetal, contrastando com outros elementos da superfície, tais como o NDVI e SAVI.

2.4.1 Sensoriamento Remoto e o teor de carbono

As estimativas sobre o teor de carbono são necessárias para um melhor entendimento sobre as mudanças ambientais globais (SILVEIRA *et al.*, 2008). Para Neeff *et al.*, (2005) a determinação das quantidades de carbono fixadas em extensas áreas, por meio do método destrutivo, torna-se onerosa e pouco eficiente. Isto tem levado os pesquisadores a estimar a biomassa e carbono florestal com o uso de dados de sensores remotos, correlacionando-os com as equações alométricas *in situ* (BROWN, 2002). A possibilidade de medir o volume de biomassa a partir de dados de sensoriamento remoto tem atraído pesquisas, especialmente pela redução de tempo e custo na obtenção dos resultados (ALMEIDA *et al.*, 2009).

Estimativas de biomassa acima do solo e estoques de carbono na Floresta Ombrófila Mista por métodos não destrutivos baseados em sensoriamento remoto são escassos, podendo-se citar como um dos poucos trabalhos o de Watzlawick *et al.* (2009).

Segundo Rosenqvist *et al.* (2003) o sensoriamento remoto, em comum acordo com o IPCC é um caminho em aberto para se estimar o teor de carbono e monitorar o fluxo de CO₂ decorrentes de mudanças no uso da terra e florestas sob o ponto de vista de larga escala (MUUKKONEN; HEISKANEN, 2007).

Para Labrecque *et al.* (2006), os métodos para mapeamento de biomassa florestal, associados ao uso de dados obtidos por sensores remotos, têm duas principais abordagens: (i) os que envolvem modelagem radiométrica (físicos); (ii) aqueles que se utilizam de tabelas de conversões para uma classificação temática na imagem.

Os métodos radiométricos são comumente utilizados e implicam análises de regressão, de forma a correlacionar dados espectrais (físicos) com medidas ou estimativas de biomassa e carbono para os locais correspondentes (FOODY *et al.* 2003)

Com a disponibilidade de imagens de alta resolução, provenientes de sensores remotos orbitais, o sensoriamento remoto tem sido utilizado para estudos relacionados à estimativa de biomassa florestal e ao sequestro de carbono, com base na associação do conteúdo de biomassa e carbono aos valores de radiância/reflectância, obtidos com a utilização de imagens de satélite (WATZLAWICK *et al.*, 2009)

Atualmente, para estimativas regionais de biomassa, os dados provenientes de sensores remotos são amplamente utilizados. Esses sensores podem ser ópticos, de RADAR, multiespectrais ou *Laser scanners* (MAIN-KNORN *et al.*, 2011; GARCÍA *et al.*, 2012).

O sensoriamento remoto ativo tem se mostrado uma das alternativas eficientes para o inventário da biomassa florestal (HUDAK *et al.*, 2012; NAESSET *et al.*, 2008).

Para os métodos indiretos de análise de biomassa, observa-se nos últimos anos um avanço crescente do uso do sensoriamento remoto por meio do processamento digital de imagens de satélite e dados LiDAR, como uma alternativa versátil e eficiente para os estudos da quantificação da biomassa e do teor de carbono florestal, como visto em trabalhos publicados por Hudak *et al.* (2012).

Dentre as técnicas atuais de sensoriamento remoto ativo, o perfilhamento a laser aerotransportado (*Airborne LASER scanning*), tem surgido ganhando relevância no cenário florestal (HUDAK *et al.*, 2012; JENSEN, 2009; NAESSET 2008; VIERLING *et al.*, 2011).

O Serviço Florestal Norte-Americano vem aplicando a tecnologia *Light Detection and Ranging* (LiDAR) há alguns anos e obtendo bons resultados. Boa parte dessas experiências são relatadas em artigos publicados por Reutebuch *et al.* (2003) e Hudak, *et al.* (2012).

2.5 A tecnologia LiDAR

Light Detection and Ranging, ou detecção de luz e distância, é um termo que tem sido utilizado para designar esta nova tecnologia de sensoriamento remoto (GIONGO *et al.*, 2010).

A tecnologia LiDAR também é conhecida por sistema de varredura, rastreamento ou perfilhamento a laser, que se origina do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, e significa “amplificação de luz por emissão estimulada de radiação”. É uma tecnologia que combina as medições de luz de laser e de posicionamento para realizar levantamentos e mapeamentos, com alta precisão, de objetos presentes na superfície em estudo, resultando numa nuvem de pontos tridimensional referente aos objetos imageados, já georreferenciados. (NOAA, 2013; MARTÍNEZ TOBÓN *et al.* 2013). Seu funcionamento baseia-se na utilização de pulsos de laser que é disparado na direção da superfície terrestre (CENTENO; MITISHITA, 2007), os quais têm a capacidade de transpassar em diferentes níveis os objetos encontrados na superfície terrestre.

A estimativa da biomassa mediante a tecnologia LiDAR é um método de sensoriamento remoto que permite inventariar grandes superfícies mediante a um processamento adequado

de dados, cuja exatidão supera a tecnologia RADAR e os métodos ópticos passivos (FALLAH VAZIRABAD e KARSLIOGLU, 2011; ZOLKOS *et al.*, 2013).

O avanço da tecnologia LiDAR como fonte de informação geografia, permite obter com um nível de detalhe que outras tecnologias de captura de informações não conseguiram. Resultados expressos em estudos desenvolvidos nos países pioneiros no uso dessa tecnologia, a Espanha, Holanda, Noruega, Estados Unidos, entre outros. Os principais usos são no campo florestal, especificamente nos inventários florestais e na obtenção de diversas variáveis dassométricas como o Volume Florestal, densidade, área bassimétrica, biomassa, entre outras; obtendo resultados satisfatórios desde a rapidez de aquisição dos dados, no nível de detalhe e precisão planimétrica e altimetria (MARTÍNEZ TOBÓN *et al.*, 2013 e POPESCU *et al.*, 2011).

Com isso a capacidade de LiDAR para medir com precisão os atributos estruturais da floresta (por exemplo, altura e heterogeneidade vertical) diversifica e enriquece os modelos de biomassa desenvolvidos a partir de suas métricas, o que se reflete por erros consideravelmente mais baixos, quando comparados com outros sensores (ZOLKOS, 2013). Neste sentido, Hudak *et al.* (2012) afirmam que a tecnologia LiDAR tem grande potencial para oferecer estimativas a extensas áreas, que se comparadas com métodos convencionais, apresentam alta precisão em pouco tempo e a um baixo custo.

Então, o sensoriamento remoto através da tecnologia LiDAR tem se mostrado uma das alternativas eficientes atualmente para o inventário da biomassa florestal (HUDAK *et al.*, 2012, NAESSET *et al.*, 2008).

Ademais, métodos de regressão têm provado serem eficazes para a modelagem da biomassa com métricas de produtos de aerotransportados. (ZHAO *et al.*, 2012; SALAS *et al.*, 2010; ZOLKOS *et al.*, 2013). Por exemplo, equações alométricas são normalmente utilizadas para relacionar medições de biomassa florestal em campo com características físicas advindas dos dados arbóreos do LiDAR. Estornell *et al.* (2012) realizaram estudos para estimar biomassa de arbustos, com métodos de regressão realizados entre a biomassa arbustiva e métricas de altura (média e desvio padrão) derivadas de dados sensores aerotransportados. Entretanto, Olsoy *et al.* (2014) trabalhou a correlação entre a biomassa do arbusto *Artemisia tridentata* e dados de volume derivados de sensores terrestres de LiDAR.

A importância da realização de estudos com dados LiDAR aumenta na medida em que mapeamento rápido e eficiente de floresta e da biomassa acima do solo é urgentemente necessária para o estudo das mudanças climáticas globais, especialmente para a avaliação dos estoques de carbono acima do solo em áreas de difícil acesso (TSUI *et al.*, 2013).

Além disso, o uso do sistema LIDAR possibilita obter modelos digitais de terreno (MDT), curvas de Nível, modelos digitais de Elevação (MDE), produzir vídeos temáticos, entre outros trabalhos que necessitem de muita precisão. Por modelo digital de terreno designa-se qualquer conjunto de dados em suporte numérico que, para uma dada zona, permita associar a qualquer ponto definido sobre o plano cartográfico um valor correspondente à sua altitude (MATOS, 2001).

Os resultados do MDT's resultantes do LiDAR apresentam alta resolução, além de servirem como suporte a análise de características de interesse em diversos projetos, como por exemplo, dos projetos rodoviários, atribuindo a eles informações diversas como declividade, aspectos topográficos e outras características da forma do relevo, além de ser fundamental para o estudo da biomassa florestal. Para Schafer e Loch (2005) tem-se a possibilidade de gerar mapas tridimensionais precisos e atualizados para otimização de projetos e processos de construção.

3. O ESPAÇO NATURAL DA MONTANHA DE ALINYÀ

O Espaço Natural da Montanha de Alinyà, se estende 5352,13 ha pelo município *Figols i Alinyà*, pertencente à província de Lérida, situada na Comunidade Autônoma de Catalunha, na Espanha. Suas coordenadas centrais correspondem a E 1°25'22,8'' e N 42°10'49,1''. Situado entre a *Sierra del Cadí* e o rio Segre, este espaço natural compreende a maior área particular da Catalunha, pertencente à Fundação Catalunya-La Pedrera (FCLP).

A Montanha de Alinyà está situada na vertente meridional do Pirineo. Esta cordilheira se formou durante a orogenia Alpina. A decorrer dos 50 milhões de anos os esforços tectônicos foram levantando esta cordilheira, pregando e acumulando grandes unidades rochosas. Assim, Alinyà se encontra em uma zona geológica muito complexa. Encontramos materiais mesozoicos por cima de materiais eocenos (Terciário) muito mais recentes, e estas unidades sobrepondo materiais oligocenos, também do Terciário, da bacia do Rio Ebro. Estas unidades tectônicas conFiguram uma paisagem formada por altos relevos e cortadas por profundos vales.

A complexa estrutura da zona, com variações contínuas da materiais, nos oferecem uma paisagem bastante variada, com fortes contrastes entre as zonas planas, onde se encontram materiais suaves que permitem o desenvolvimento da vegetação, e relevos abruptos, principalmente calcários, com falésias e pouco recobrimento vegetal (FUNDACIÒ CATALUNYA-LA PEDRERA, 2015). Na Figura 2 se pode observar o relevo acidentado do espaço natural.

Figura 2: Visão aérea da Montaña de Alinyà.



Fonte: Fundació Catalunya – La Pedrera (2015).

A disposição altitudinal, que vai desde os 608 metros até 2739 metros, o relevo e a orientação das encostas, as áreas voltadas ao sol e à sombra, dão lugar a diferentes zonas com microclima característico, o clima prepirenaico.

As temperaturas médias variam entre os 8°C e os 16°C, com o fenômeno de inversão térmica no fundo do vale nos meses de frio. Estas características climáticas incluem a área na região euro-siberiana, incluindo, também, áreas que são tipicamente mediterrâneas (MOISÉS *et al.*, 2004). Devido à situação geográfica a pluviosidade média varia entre os 650mm e os 1100mm, onde os valores máximos ocorrem durante a primavera e o verão. Já os mínimos, durante o inverno.

A vegetação presente nas porções baixas e médias do vale de Alynia se caracteriza por bosques de azinheiras e pinhais mediterrâneos, como o pinheiro silvestre (*Pinus sylvestris*), o pinheiro larício (*Pinus nigra*), a azinheira (*Quercus ilex*) e o carvalho púbere (*Quercus humilis*), com uma predominância do buxo (*Buxus sempervirens*) nas zonas mais baixas. Também são encontrados os álamos (*Populus alba*), choupos (*Populus nigra*) e Amieiros (*Alnus glutinosa*) como espécies mais representativas das unidades de bosques ribeirinhos que se desenvolvem perto das fontes de água. Na parte mais elevada do vale, se estende o ecossistema subalpino, em que predomina o substrato herbáceo, como os prados de festuca (*Festuca* sp.), e os matagais com árvores de pequenas dimensões, devido a falta de nutrientes no solo, nevascas e fortes ventos, como são os matagais de cedro (*Juniperus communis*) e muitos casos de pinheiros negros (*Pinus uncinata*) (MOISÉS *et al.*, 2004). Na Figura 3 se observa a presença de pinhais na região de *Obaga de Companys*, na *Montanha de Alinyà*.

Figura 3: Pinhais em Obaga de Companys, Montaña de Alynia.



Fonte: Espai Natura Muntanya D'Alinyà (2015).

Além disso, a Montanha de Alinyà é um famoso cenário e refúgio de espécies emblemáticas como a camurça e o tetraz-grande. Também se observam as quatro espécies de abutres que vivem na Europa: o abutre foveiro, abutre barbudo, abutre preto e o abutre do Egito. Na Figura 4 se observam exemplares da espécie de abutre preto (*Aegypius monachus*).

Figura 4: Abutre preto, Montaña de Alinyà.



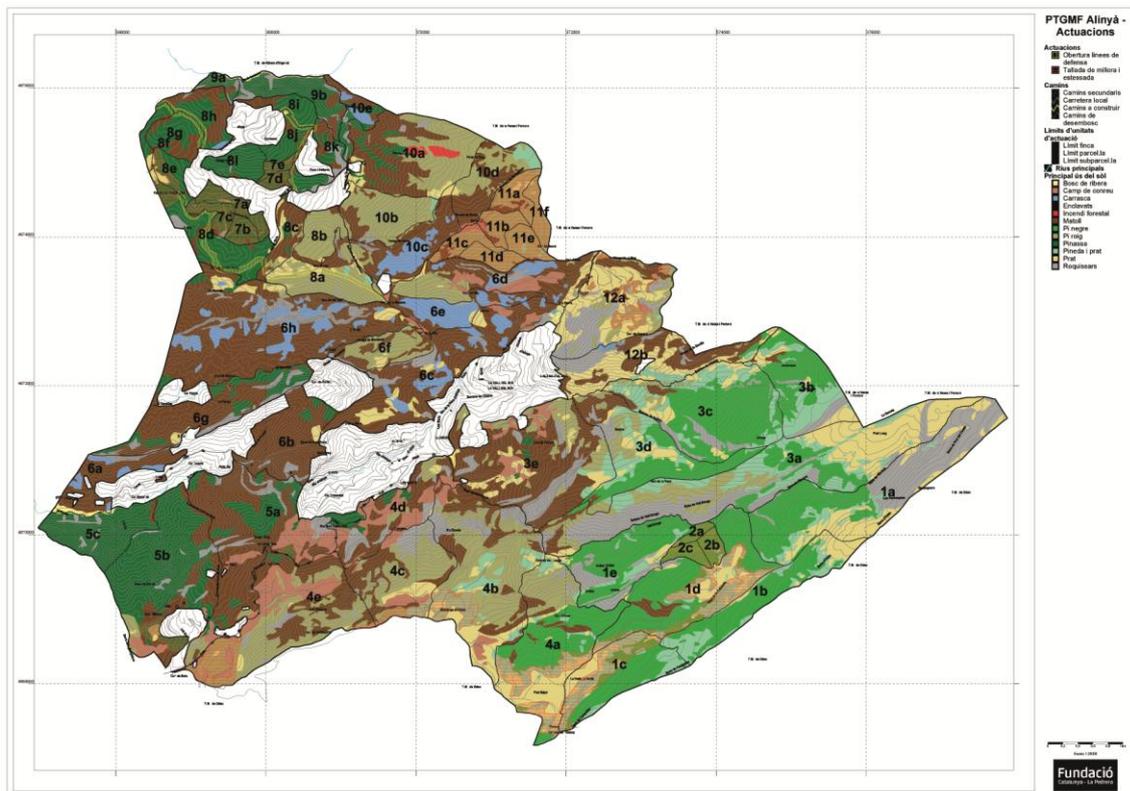
Fonte: Espai Natura Muntanya D'Alinyà (2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Dados do inventário

Para a realização deste estudo, foram utilizados como referência, dados provenientes do Inventário Florestal elaborado pela Fundação Catalunya - La Pedrera no período de Junho a setembro de 2013. O produto cartográfico deste inventário é apresentado na Figura 5.

Figura 5: Delimitação da Montanha de Alinyà de acordo com as características físicas e fitogeográficas.



Fonte: Inventário Florestal da Fundação Catalunya – La Pedrera (2013).

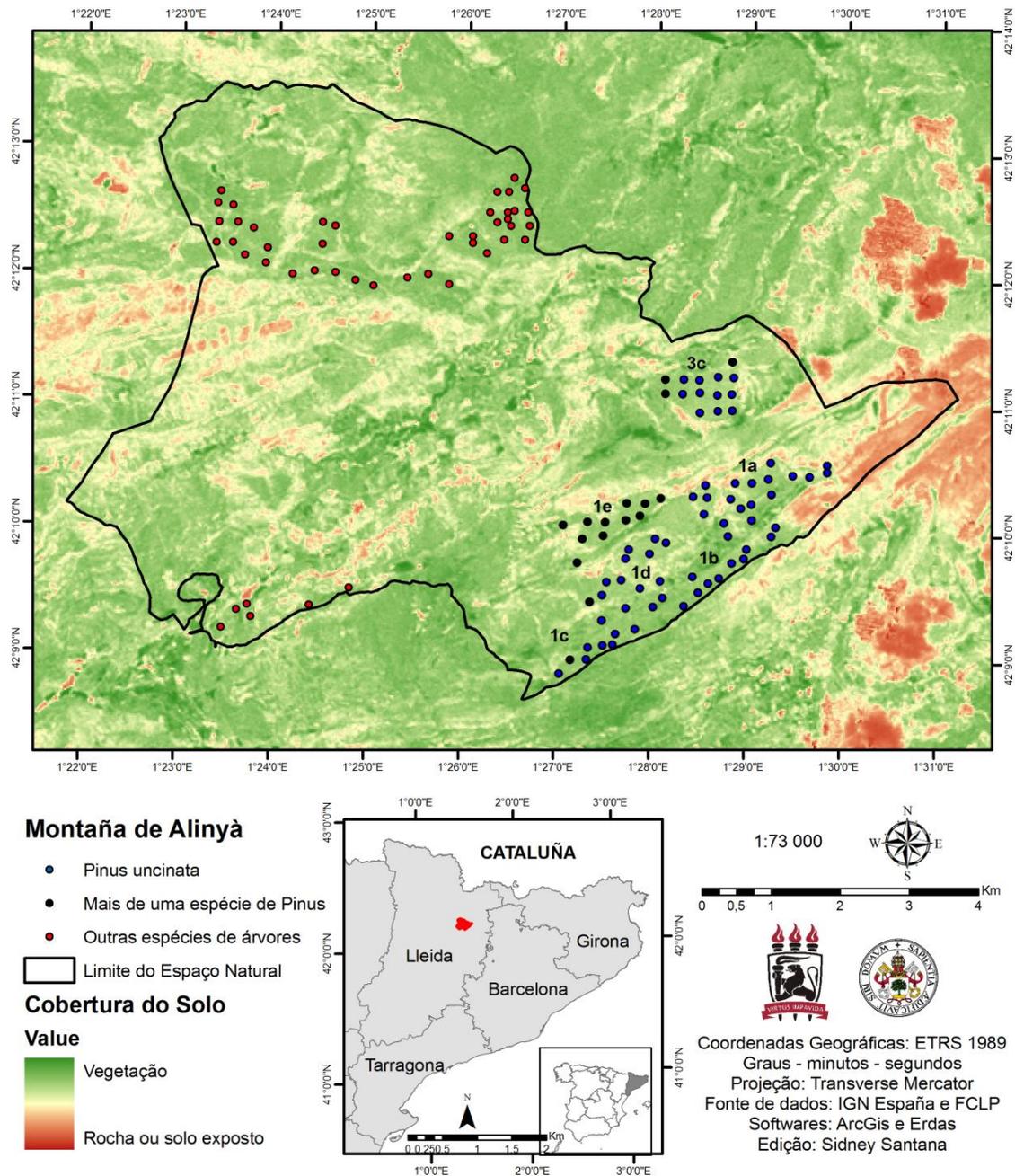
Pode-se constatar, ao observar a Figura 5, que o Espaço Natural da *Montanha de Alinyà* foi dividido em zonas de acordo com as características físicas e fitogeográficas do meio. Os dados fornecidos por este inventário constituem, por uma parte, as coordenadas centrais, o raio e a superfície total das 123 parcelas circulares, assim como o número de pés por classe de diâmetro e, por outra, os dados referentes à área basal e biomassa para cada uma das zonas inventariadas de acordo com a metodologia do CREAM (Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales) (Generalitat de Catalunya).

Como base de confronto com os dados LiDAR, e posterior obtenção de modelos de regressão, foram eleitas 5 zonas (1a, 1b, 1c, 1d e 3c) de massa homogênea ou com

predominância de *Pinus uncinata*. Essas zonas compreendem as parcelas circulares de raio médio de 12 metros e uma superfície de referência de 452,39m². Das 60 parcelas selecionadas 13 pertencem a zona 1a, 12 a zona 1b, 9 a zona 1c, 16 a zona 1d e 11 a zona 3c.

A Figura 6 corresponde ao mapa do espaço natural, com os 123 pontos do inventário. Estes pontos foram distinguidos neste estudo por três cores. Os pontos em azul correspondem às parcelas onde ocorre *P. uncinata* exclusivamente, analisados neste trabalho; os pontos de cor preta referem-se a parcelas pertencentes às zonas incluídas nessa pesquisa, porém, por haver ocorrência de mais de uma espécie de *Pinus*, foram desconsiderados nos cálculos estatísticos deste estudo; os pontos em vermelho compreendem a parcelas com ocorrência de outros grupos de árvores, tanto pinheiros quanto frondosas, sendo excluídos desta investigação.

Figura 6: Mapa do Espaço Natural Montaña de Alinyà, com a localização das parcelas inventariadas.

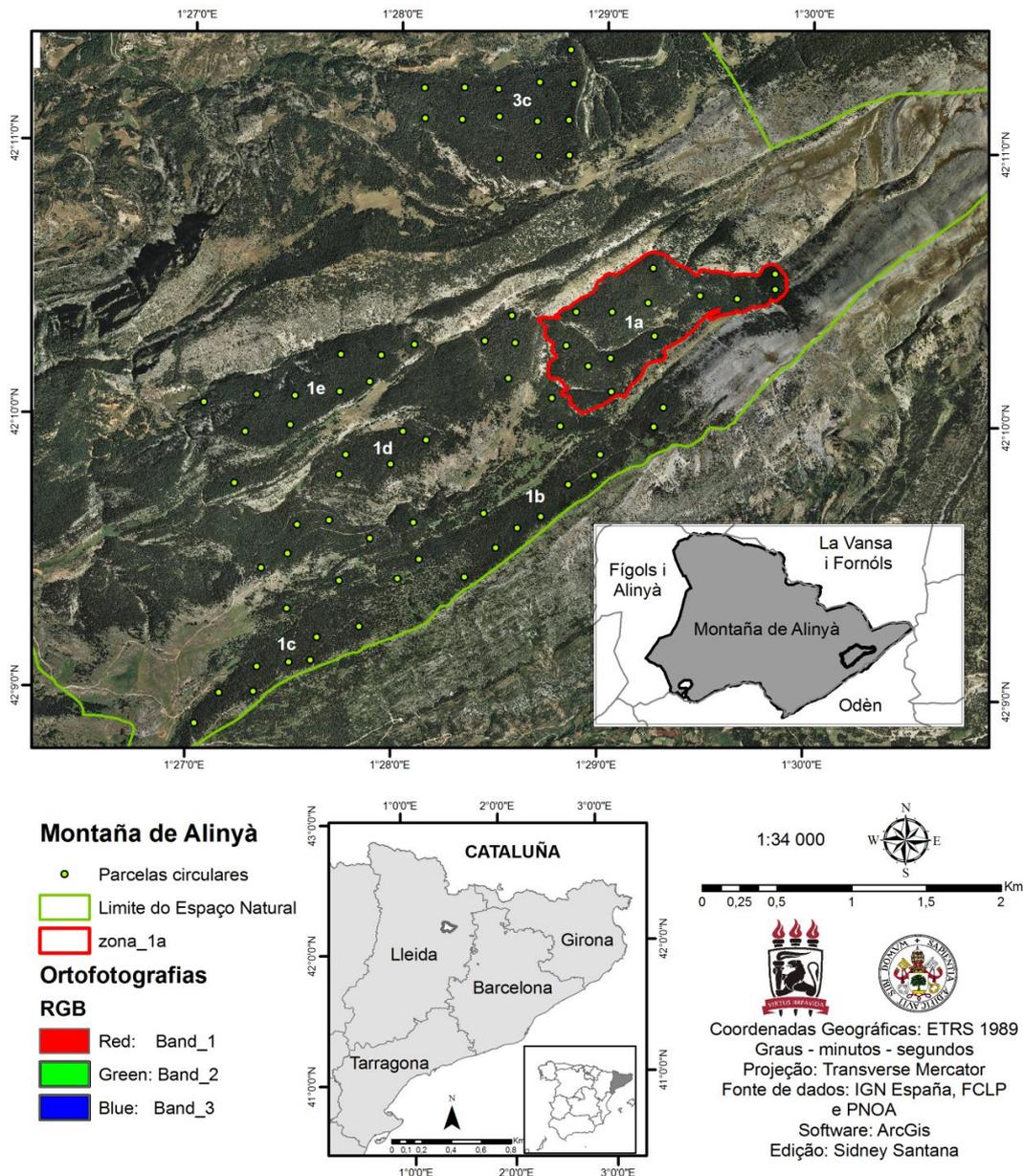


4.2 Área de estudo

Em meio à paisagem da montanha de Alinyà, se apresentam vários fragmentos florestais de pinheiros e frondosas. O processo de fragmentação destes bosques resulta de ações humanas e fatores geomorfológicos atrelados ao clima. Algumas dessas massas florestais passam por processo de regeneração, outras, de perda de biomassa, e ainda outras que não foram diagnosticadas. Nesse sentido, o projeto *Life*, por exemplo, desenvolve um estudo denominado *Low to High Productions (LtHP)* sobre o potencial de teor de carbono em

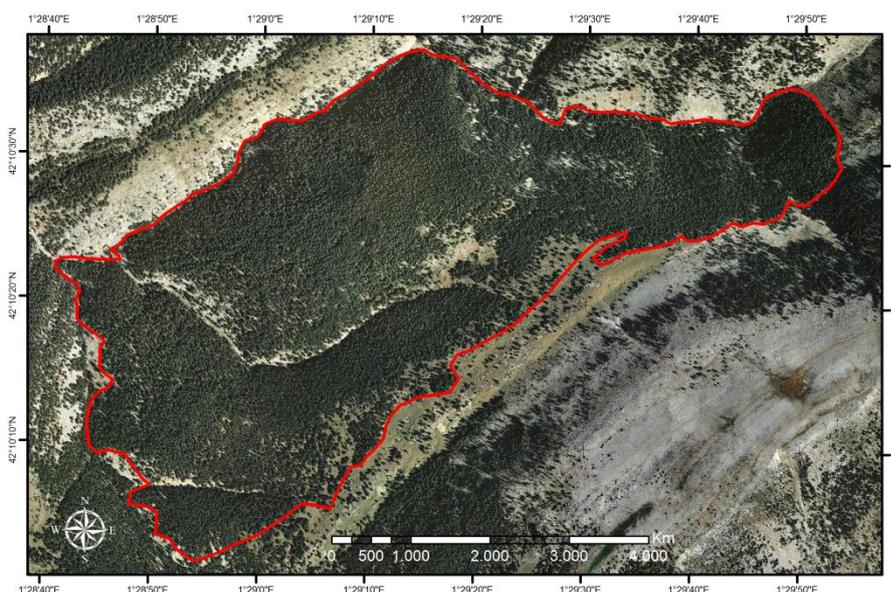
alguns fragmentos florestais desta área. Portanto, a zona ‘1a’ foi selecionada como área de estudo desta investigação por ser uma área com potencial teor de carbono, e por apresentar uma massa homogeneia de *Pinus uncinata*. Com uma área de 83,17ha, nesta zona foram catalogadas, pelo inventário da fundação, 13 parcelas circulares como mostra a Figura 7.

Figura 7: Localização da área de estudo (zona 1a) e as parcelas do inventário.



Em sequência, a Figura 8 corresponde à zona 1a.

Figura 8: Delimitação da Zona 1a.



Fonte: Editado pelo autor / PNOA (2013).

No anexo 1, são apresentadas as imagens tridimensionais da área de estudo, disponibilizadas pelo *Google Earth*, para facilitar a interpretação do contexto paisagístico da zona.

4.3 Aquisição e processamento dos dados matriciais

Para a realização deste trabalho foram adquiridas 7 imagens *Thematic Mapper* (TM) do programa Landsat 5, correspondentes a cena *path* 198 e *row* 31. Estas imagens compreendem a uma parte do território da Catalunha, incluindo o Espaço Natural da Montanha de Alinyà; foram registradas nas datas de 28 de julho de 1984, 01 de julho de 2003, 06 de Junho de 2006, 28 de Junho de 2008, 01 de Julho de 2009, 04 de Julho de 2010 e 21 de Junho de 2011.

Depois da obtenção das imagens do Landsat, todas as 7 bandas espectrais de cada uma foram empilhadas de modo que resultem em um só produto com distintas faixas do espectro. Este e os demais processamentos foram realizados pelo software ERDAS Imagine, com licença adquirida pelo Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco.

Em seguida foi realizada a correção geométrica das imagens, passo que consiste em retificar a localização dos pontos da imagem de acordo com as respectivas coordenadas adequadas. Para este estudo o sistema geodésico de referência utilizado nos produtos

corresponde ao *Europe Terrestrial Reference System* 1989 (ETRS 89), representado com as coordenadas do sistema *Universal Transverse Mercator* (UTM) da zona 31 norte.

4.3.1 Cálculo de radiância

Posteriormente foi calculada a calibração radiométrica (Equação 1), processo de transformação do número digital (ND) de cada pixel da imagem em Radiância espectral, segundo relação proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} \times ND \quad (1)$$

em que a e b são os valores das radiâncias espectrais mínima e máxima, ND é o valor do pixel em número digital, e i corresponde às diferentes bandas do satélite.

4.3.2 Cálculo de reflectância

Com a equação proposta por Bastiaanssen (1995) foi encontrada a reflectância, que é a razão entre o fluxo emergente da atmosfera e o fluxo incidente no seu topo, na região e banda espectral analisada:

$$r_{\rho i} = \frac{L_{\lambda i} \pi}{K_{\lambda} \cos Z \cdot dr} \quad (2)$$

em que λ_i L é a radiância espectral de cada banda, K_{λ} é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera, Z é o ângulo zenital solar e dr é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol (r_0) e a distância Terra-Sol (r), em dado dia do ano (LIRA, 2010).

4.4 Índices de vegetação

Os índices de vegetação são medidas radiométricas adimensionais, as quais indicam a abundância relativa e a atividade da vegetação verde, incluindo o índice de área foliar, porcentagem de cobertura verde, teor de clorofila, biomassa verde e radiação fotossinteticamente ativa absorvida (JENSEN, 2009). O sucesso de suas aplicações se fundamenta no fato de que a produção primária de uma comunidade vegetal tem estreita relação com a energia solar absorvida, o que define o desenvolvimento dessa comunidade (FONTANA *et al.*, 1998).

4.4.1 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI

O *Normalized Difference Vegetation Index* ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto por Rouse *et al.* (1974) (Equação 3), é calculado pela diferença de reflectância entre a faixa do infravermelho próximo (NIR), correspondente a banda 4 do Landsat 5, e faixa do vermelho no visível (VIS), correspondente a banda 3 deste satélite, dividida pela soma das faixas NIR e VIS:

$$\text{NDVI} = \frac{(r_{p4} - r_{p3})}{(r_{p4} + r_{p3})} \quad (3)$$

em que r_p é o valor de reflectância referente a cada banda, sendo o algarismo que acompanha a variável, o número que representa a banda.

O intervalo de valores do NDVI parte de -1 a 1, onde os valores abaixo de 0 correspondem a água, até 0,1 são atribuídos a ausência de vegetação, e, a partir daí, na medida em que vai ascendendo, vai indicando maior presença de vegetação. Normalmente, os valores máximos atingidos pelo NDVI são de 0,8. Geralmente os demais índices de vegetação apresentam valores dentro desse intervalo.

4.4.2 Índice de Vegetação Ajustado ao Solo - SAVI

O *Soil Adjusted Vegetation Index* ou Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (SAVI), proposto por Huete (1988), se distingue do NDVI por apresentar um fator de ajuste de solo (L) (Equação 4). Neste estudo, o fator de ajuste tem o valor de 0,5.

$$\text{SAVI} = \frac{(1 + L)(r_{p4} - r_{p3})}{(L + r_{p4} + r_{p3})} \quad (4)$$

em que r_p é o valor de reflectância referente a cada banda, sendo o algarismo que acompanha a variável, o número que representa a banda.

4.4.3 Raster para ascii

Posteriormente, foram feitos recortes nos produtos resultantes das aplicações dos índices de vegetação respeitando os limites da área de estudo. Em seguida esses recortes foram convertidos de formato *raster* (dados matriciais ou imagem) para formato *ascii*

(planilha de dados). Esse processo foi realizado para que seja possível a análise dos dados fornecidos pelos índices de vegetação.

4.5 Os dados LiDAR

Para que seja possível realizar os trabalhos com os dados LiDAR, foram adquiridas cinco cartas resultantes do voo sobre a área de estudo, realizado nos anos de 2009, 2010 e 2011 pelo Instituto Geográfico Nacional da Espanha pertencente ao Plano Nacional de Ortografia Aérea (PNOA). As cartas obtidas foram: PNOA: 2009 Lote: CAT 370-4668 ORT-CLA-COL, PNOA: 2009 Lote: CAT 372-4668 ORT-CLA-COL, PNOA: 2009 Lote: CAT 372-4670 ORT-CLA-COL, PNOA: 2009 Lote: CAT 372-4672 ORT-CLA-COL, PNOA: 2010 Lote: CAT 374-4670 ORT-CLA-COL e PNOA: 2011 Lote: CAT 374-4672 ORT-CLA-COL.

Durante o processamento foi aplicado uma correção com os fatores de crescimento anuais obtidos do *Inventario Forestal Nacional* (IFN3). Os arquivos adquiridos se configuram como nuvem de pontos em formato “las”, já reclassificados. Isto significa que os pontos são discriminados de acordo com essa classificação. O quadro 2 apresenta as classes estabelecidas por esse método.

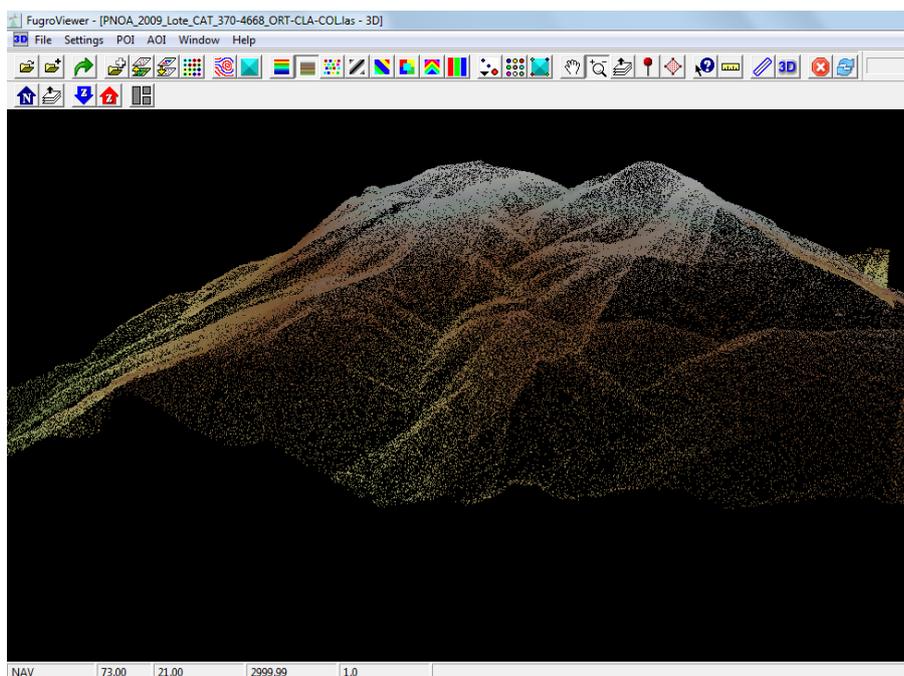
Quadro 2: Classes da nuvem de pontos gerada a partir dados LiDAR.

Número da classe	Nome da classe
0	<i>Never classified</i>
1	<i>UnClassified</i>
2	<i>Ground</i>
3	<i>Low Vegetation</i>
4	<i>Med Vegetation</i>
5	<i>High Vegetation</i>
6	<i>Buiding</i>
7	<i>Low Point (Noise)</i>
8	<i>Model Key Point</i>
9	<i>Water</i>
10	<i>ASPRS – Reserved</i>
11	<i>ASPRS - Reserved</i>
12	<i>Overlap</i>
13 a 31	<i><undefined></i>

Para esta investigação foram selecionados os arquivos correspondentes às áreas de interesse, totalizando 1,4 Gb de informação. Estes arquivos compreendem o área de estudo e as demais áreas onde se encontram as parcelas do inventário correspondentes à massa florestal de *Pinus uncinata*, objeto desta análise.

Para que fosse possível a visualização da nuvem de pontos LiDAR utilizou-se o software livre FugroViewer™ (Fugro) (Figura 9). Para gestão e o filtrado se utilizou o software, também livre, Lastools (Martin Isenburg, LAStools). E, quanto à análise, o cálculo de variáveis e a visualização, tanto dos pontos quanto dos produtos gerados, foi recorrido ao software de livre distribuição FUSION/LDV, desenvolvido pelo *Forest Service – USDA* (Serviço Florestal do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos) (MCGAUGHEY, 2014).

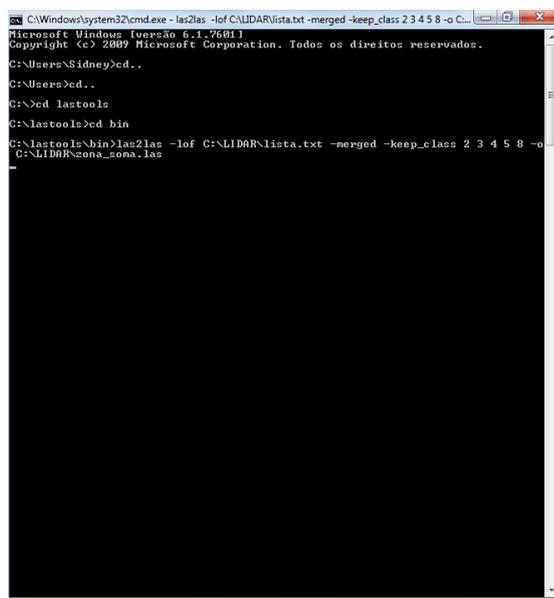
Figura 9: Visualização da nuvem de pontos LiDAR pelo FugroViewer.



Então, das 31 classes predefinidas em que estão subdivididos os pontos LiDAR, foram consideradas para este estudo as correspondentes ao solo (classe 2), à baixa vegetação (classe 3), à média vegetação (classe 4), à alta vegetação (classe 5) e ao *model key point* (classe 8). Para realizar este processo de filtragem das classes desejadas, foi utilizada a ferramenta ‘-keep_class 2 3 4 5 8’, no *software* Lastools. Em seguida, no mesmo programa, foi utilizada a ferramenta *lasclip*, para selecionar e extrair a informação contida no arquivo “*las*” correspondente à área de interesse. Como o Lastools é um programa sem interface, os comandos foram executados no cmd do Windows (Figura 10). Tais comandos são escritos

com base nas instruções do FUSION Manual, basicamente, compondo a sintaxe o seu *switch*, o diretório de entrada, as ferramentas utilizadas, os dados que serão trabalhados, o diretório de saída.

Figura 10: Execução do comando no LasTools por meio do cmd do Windows.



```

C:\Windows\system32\cmd.exe - las2las -lof C:\LIDAR\lista.txt -merged -keep_class 2 3 4 5 8 -o C:\LIDAR\zona_soma.las
Microsoft Windows [versão 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\Sidney>cd..
C:\Users>cd..
C:\>cd LasTools
C:\LasTools>cd bin
C:\LasTools\bin>las2las -lof C:\LIDAR\lista.txt -merged -keep_class 2 3 4 5 8 -o
C:\LIDAR\zona_soma.las

```

4.6 Modelos Digitais de Terreno

Neste trabalho foi gerado um Modelo Digital de Superfícies (MDS) da área de estudo e das demais cartas utilizadas. A criação do MDS a partir dos dados LiDAR foi necessária para poder separar o solo da massa vegetal, para que assim, fosse possível a realização dos cálculos de biomassa florestal. O MDS foi obtido por meio do *software* FUSION, com o comando denominado *GridSurfaceCreate*. Esse comando constrói uma grade de valores em formato 'dtm', onde cada célula desta grade contem os resultados das elevações médias dos pontos LiDAR. São mais considerados nesse processo, os pontos classificados como solo.

Os *switches* pertencentes à sintaxe desse comando se organizaram da seguinte forma para este estudo:

```

GridsurfaceCreate /class:2 C:\Diretório de saída\nome do produto.dtm 1 m m 1 0 0 0
C:\Diretório de entrada\dados LiDAR.las

```

Neste caso *GridsurfaceCreate* se refere ao comando, *class:2* faz referência à classe dos solos. Para a série '1 m m 1 0 0 0', o primeiro '1' prescreve que o tamanho de cada célula da grade corresponde a um metro; a unidade 'metro' é indicada pela letra 'm' que segue o '1';

o segundo ‘*m*’, determina que a elevação também seja dada em metros. O próximo *switch* ‘*1*’ estabelece que a superfície tenha as suas coordenadas compreendidas no sistema UTM. Em sequência os três zeros indicam que o fuso em que está compreendida a área, o datum horizontal e o datum vertical, consecutivamente, ficam indeterminados.

O próximo passo consistiu em exportar o MDS de formato *dtm* para formato *ascii*, para que seja possível dar sequência ao processamento dos dados. Para isso foi executado, no FUSION, o comando ‘*dtm2ascii*’. Seguidamente, o produto *ascii* foi convertido para o formato *raster*. Esse processo foi realizado no *software* ArcGis, por meio da extensão *ArcToolbox*. Nessa caixa utilizou-se o instrumento *ascii to raster* do pacote de ferramentas *Conversion Tools*.

Um processo similar foi adotado para gerar o Modelo Digital de Alturas de Vegetação (MDHV ou *Canopy model*) da área. Neste caso o comando utilizado foi o *CanopyModel*, com *switches* semelhantes. Em seguida, os dados MDHV foram exportados de *dtm* para *ascii*, e logo convertido para *raster*.

4.7 Dados do Inventário vs LiDAR

4.7.1 Função *ClipData*

Com a função *ClipData* se extrai uma porção da nuvem de pontos, a qual se deseja trabalhar. Esse método consistiu em gerar a série de estatísticos LiDAR das parcelas circulares, com raios similares àqueles mensurados no terreno pela fundação, obtendo no centro de cada circunferência seu respectivo ponto dos 60 selecionados. Nesse processo recorreu-se a essa função no FUSION, na qual seus *switches* são escritos da seguinte maneira:

“*clipdata /shape:1 /dtm:C:\ ‘diretório do arquivo MDT’.dtm /height /class:(2,3,4,5,8) C:\ ‘diretório do arquivo LiDAR’.las C: ‘diretório e nome do arquivo de saída’.las coordenada central X, coordenada central Y, coordenada máxima X, coordenada máxima inferior Y, coordenada máxima superior X, coordenada máxima superior Y.*”

Em que:

Clipdata = Ferramenta utilizada

shape 1 = determina o formato circular do *clip* gerado.

height = determina que os pontos considerados são aqueles acima do MDT.

class:(2,3,4,5,8) = estabelece as classes de pontos existentes no produto gerado.

O resultado desse comando são circunferências, em formato de arquivo *las*, correspondentes às parcelas circulares do inventário. Entretanto, para obter maior precisão na correlação entre os dados LiDAR e os dados do inventário, foi realizado o cálculo com os valores da superfície de referência (459,39 m²), a fim de encontrar os valores da superfície ideal (Equação 5):

$$\text{Sup. real} = \text{Sup. ideal} * \cos[\text{arctg}(x)] \quad (5)$$

Em que x representa o valor da declividade do terreno onde se encontra a parcela.

Dessa forma, os diferentes graus de declividade se atrelam a diferentes dimensões de circunferência que, conseqüentemente, distinguem-se nos tamanhos dos seus raios. Logo, foram calculados os comprimentos dos raios reais utilizando a Equação (6)

$$\text{Raio real} = \sqrt{\text{sup real}/\pi} \quad (6)$$

Após a obtenção dos valores dos raios reais foi possível estabelecer na função *ClipData* do FUSION o tamanho das circunferências, acrescentando e diminuindo esses valores nas coordenadas centrais. As tabelas com os valores de superfícies e raios reais das parcelas se encontram no Anexo 2.

4.7.2 Função Cloudmetrics

Após a obtenção dos 60 *clips*, correspondentes a cada parcela circular, foi utilizada a função *Cloudmetrics* do FUSION para extrair a bateria de estatísticos dos dados LiDAR a serem utilizados como parâmetros florestais nos modelos de regressão linear múltipla com as variáveis florestais do Inventário da Fundação. Os parâmetros se apresentam em uma lista no Anexo 3. Os estatísticos utilizados no modelo de regressão de cada variável florestal se apresentam na tabela 2.

4.8 Construção dos modelos lineares e das equações alométricas

Para aplicar a tecnologia LiDAR nos estudos de biomassa florestal, alguns pesquisadores, como Zhao *et al.* (2009), Hopkinson; Chris (2009), Garcia (2009), Swatantran *et al.*(2011), Yao *et al.* (2011); Estornell *et al.* (2011 e 2012), Ku *et al.*(2012), Lu

et al. (2012); Zolkos *et al.* (2013) e Aihua Li (2015), vêm realizando testes de modelos de regressão linear com os dados LiDAR e os dados coletados em campo.

Tomando como referência estes estudos, com a finalidade de estimar e analisar a biomassa florestal por meio dos dados de LiDAR, foram testados modelos de regressão linear. As variáveis resposta definidas nos modelos foram os dados de área basal, biomassa florestal e de teor de carbono, fornecidos pelo inventário. As variáveis explicativas correspondem à bateria de estatísticos LiDAR (Anexo 3).

Os modelos lineares estatísticos foram construídos no software de estatística de livre distribuição R, com finalidade de atingir uma boa correlação entre os dados LiDAR e os dados do inventário, e então, definir a equação alométrica para estimar a biomassa da zona 1a. As equações alométricas são equações matemáticas que relacionam a biomassa com algumas variáveis das árvores, como o diâmetro e a altura. Elas permitem estimar a biomassa das plantas com uso de medidas biométricas não destrutivas (SILVA; SAMPAIO, 2008).

Buscou-se dessa forma, além de uma boa correlação, manter o alto grau de significância na realização dos testes. Foram testados modelos para estimar também a área basal e o teor de carbono da área de estudo.

4.9 Aplicação das equações nas variáveis do LiDAR

4.9.1 Função *Gridmetrics*

A função *Gridmetrics* gera a mesma série de estatísticos que o *Cloudmetrics*, discriminados por células com tamanho ajustado pelo usuário. Nesse caso cada célula apresenta um tamanho correspondente a 20 metros de lado, para que se assimile às dimensões das parcelas circulares. Contudo os produtos gerados nesse processo se estruturam em dados de texto e números no formato ‘*csv*’.

Vale ressaltar que ao configurar o *Gridmetrics* o programa FUSION apresenta algumas falhas que se convertem em células com informações errôneas e, logo, foram eliminadas. Por isso, nos produtos cartográficos, algumas lacunas se apresentam no lugar de células.

Em seguida, no software QuantumGis, as grades em formato ‘*csv*’ foram importadas. Na tabela de atributo de cada arquivo foram eliminadas as linhas que apresentavam como valor ‘-9999’, para então serem aplicadas as equações geradas pelos modelos.

4.9.2 Equações alométricas

Após a configuração da malha de quadrículas, foram aplicadas as equações para estimar a área basal, biomassa florestal e teor de carbono da massa florestal. As equações foram aplicadas sobre a tabela de atributos, por meio da ferramenta calculadora de campo, do QuantumGIS.

Em seguida, os produtos foram convertidos em dados vetoriais.

4.10 Comparação da Biomassa florestal com o NDVI

O produto *raster* resultante da aplicação do NDVI referente ao ano de 2011 foi convertido para o formato *shape*, em que cada pixel se transformou em um ponto vetorial, para então ser comparado com a biomassa florestal da zona de estudo.

4.11 Mapeamento e *Layout*

Os produtos cartográficos apresentados neste trabalho foram construídos por meio dos *softwares* ArcMap™ (ArcGIS®) com licença adquirida pelo Departamento de Ciências Geográficas da Universidade Federal de Pernambuco, e o QuantumGIS, desenvolvido pela fundação *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo) de licença gratuita e código aberto.

Os dados vetoriais e matriciais utilizados neste estudo foram adquiridos pelo PNOA, pelo *Instituto Geográfico Nacional de España* (IGN), pelo Geoportal da *Infraestructura de Datos Espaciales de España* (IDEE) e pelo *Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya* (ICC).

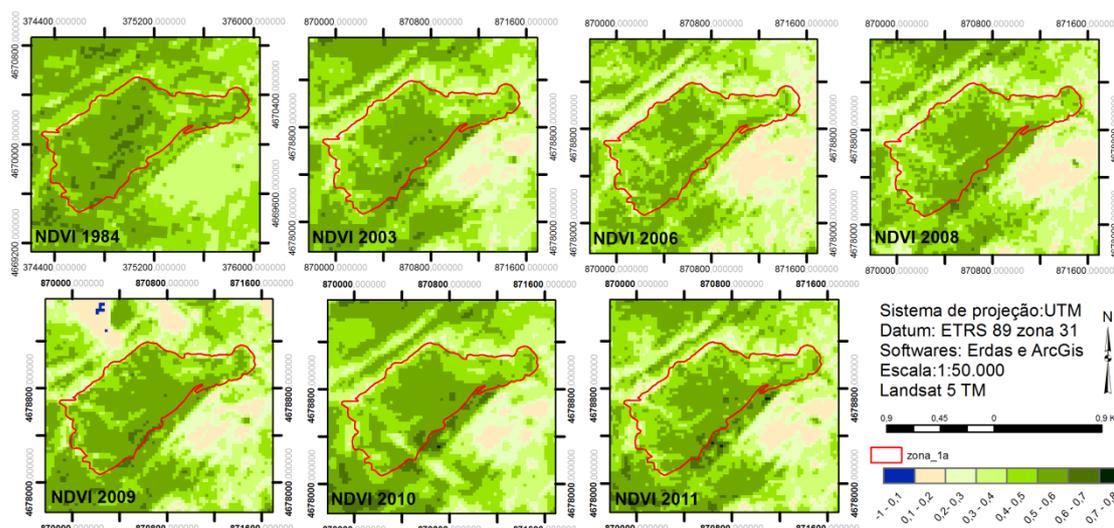
A classificação de diferentes valores nos mapas compreende ao um matiz de cores, no qual cada tom corresponde a um valor, ou por elementos cartográficos de diferentes tamanhos, concordando com diferentes valores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Índices de vegetação

A Figura 11 corresponde à aplicação do NDVI sobre nos produtos orbitais referentes à zona de estudo nos sete anos considerados.

Figura 11: Representação cartográfica do cálculo do NDVI na zona de estudo.

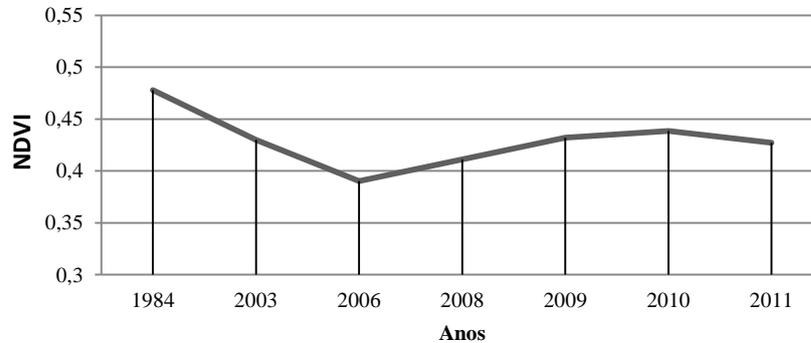


O NDVI, como a maioria dos índices de vegetação, apresenta uma escala de valores de -1 a 1, em que os valores menores que zero correspondem a corpos hídricos, de 0 a 0,15 compreendem áreas sem vegetação; a partir de então, na medida que se aumentam os valores aumenta a densidade da vegetação. Pela classificação realizada sobre o NDVI nas sete imagens quando mais escuro for o verde maior é a densidade da vegetação na área. Os tons amarelados representam áreas com ausência significativa ou total de vegetação. Com efeito, por meio da interpretação visual da Figura 11, é possível perceber que de 1984 a 2006 a massa florestal da área de estudo perde densidade, principalmente em sua porção central, visto que o NDVI consegue estimar o conteúdo de clorofila presente na vegetação. Essa diminuição da presença da vegetação também ocorre nos arredores da zona 1a. No período de 2006 a 2009, é possível observar um ganho no conteúdo florestal da zona. Até 2011 percebe-se uma variação no comportamento da massa florestal na área. Contudo, por meio da interpretação visual é difícil constatar se houve perda ou ganho de massa florestal nesses últimos anos. Dessa forma, os valores predominantes na imagem do ano de 1984 giram em torno de 0,3 a 0,7. Nos anos de 2003 observa-se um aumento das quantidades de pixels que correspondem aos valores de 0,2 a 0,4.

A média do NDVI foi obtida pelos valores do índice em todos os pixels pertencentes ao recorte da área de estudo. Neste sentido, analisar os dados gerados pelo cálculo do NDVI

ajuda a compreender o estado da massa florestal ao longo dos anos. Dessa forma, a Figura 12 corresponde ao comportamento da média do NDVI ao longo dos anos.

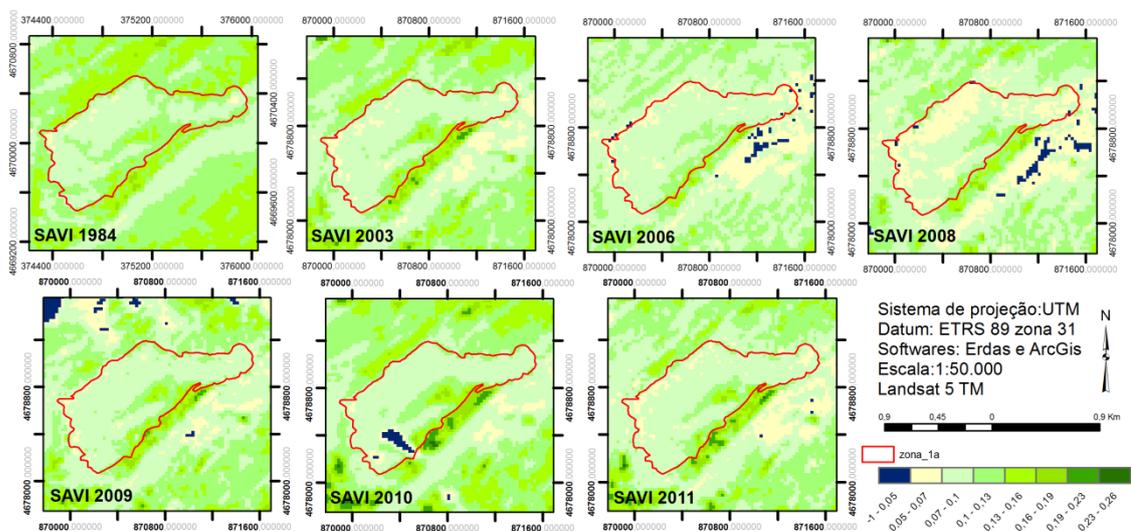
Figura 12: Média do NDVI na zona de estudo ao longo dos anos.



Observa-se na Figura 12 que a média dos valores do NDVI na zona de estudo cai de 1984 a 2006, de 0,477 para 0,390. Em seguida, a média se eleva de 2006 a 2009 (0,390 - 0,432), e mais sutilmente de 2009 a 2010 (0,432 - 0,438). Por ultimo, a média apresenta uma leve descida de 2010 a 2011 (0,438 - 0,427), indicando que esse bosque de *Pinus uncinata*, perde massa florestal neste último ano.

No entanto, com a finalidade de confrontar a projeção feita por meio do NDVI, aplicou-se o cálculo do SAVI sobre a zona, já que este índice é bastante utilizado no meio científico, por apresentar resultados satisfatórios. Dessa forma, A Figura 13 apresenta o resultado da aplicação do SAVI na área de estudo para os anos considerados.

Figura 13: Representação cartográfica do cálculo do SAVI área de estudo.

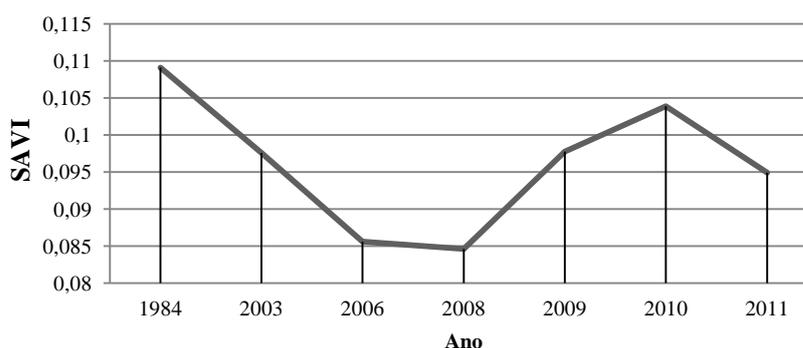


Ao observar os resultados do SAVI, e compará-los com os demais produtos como a ortofotografia, e até mesmo o NDVI, percebe-se incoerência na representação da massa florestal por esse produto. Este índice mostra que os maiores níveis de densidade vegetal não se encontram dentro dos limites da zona 1a, mas ao seu redor, não condizendo com a realidade. Muito provavelmente estes erros foram causados por conta da declividade do terreno, situado em uma encosta voltada no sentido ocidental. Outro fator agravante foi a posição relativa do sol na hora da passagem do satélite, 11h 05min – horário de Madri. Neste horário, no verão, os raios solares atingem predominantemente a porção oriental da serra. Conseqüentemente, a zona de estudo se encontrou sobre o efeito da sombra, interferindo nos resultados dos índices.

Moreira *et al.* (2015) já haviam alertado para esse problema ao realizarem um estudo a respeito dos efeitos topográficos sobre os índices de vegetação, constatando que estes são sensíveis à influência da topografia. Dentre os índices estudados pelos autores o SAVI e o EVI apresentaram maior vulnerabilidade à variação do relevo, enquanto o NDVI e o RVI mostraram-se menos sensíveis a esse efeito. De acordo com esses resultados, Epiphanyo *et al.* (1996) afirmam que o NDVI é capaz de minimizar os efeitos topográficos ao produzir uma escala linear de medidas. Por este motivo, neste estudo o NDVI apresentou-se mais coerente em representar, ou realçar, a massa florestal do que o SAVI.

Na Figura 14 é observado o comportamento das médias do SAVI ao longo dos anos considerados.

Figura 14: Média do SAVI na zona de estudo ao longo dos anos.



Mesmo com a incoerência apresentada pelo SAVI nas representações cartográficas, o comportamento das médias do índice para o recorte da zona ocorreu de forma similar ao comportamento das médias resultantes do NDVI. A diferença ocorreu no intervalo entre os anos 2006 e 2008, quando a média mostrou uma leve queda no caso do SAVI (de 0,085 para 0,084), enquanto apresentou uma leve subida, em se tratando do NDVI.

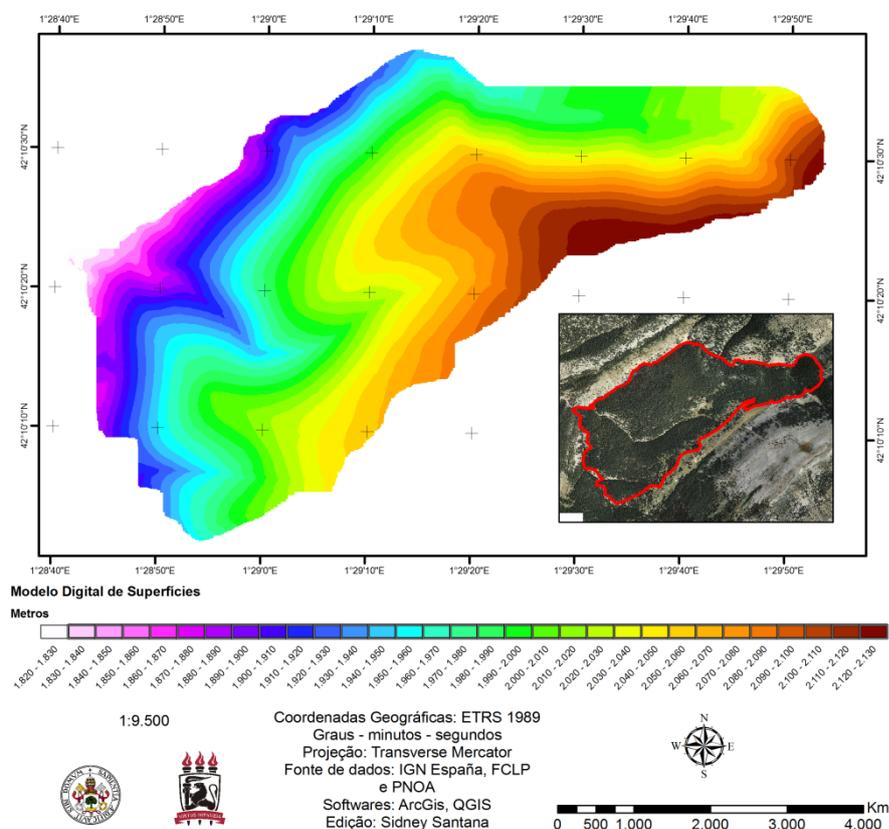
5.2 Modelos Digitais de Terreno

Por meio do processamento das informações obtidas no voo LiDAR e foram gerados os Modelos Digitais de Terreno, um de Superfícies e outro de Alturas de Vegetação.

5.2.1 Modelo Digital de Superfícies

A Figura 10 corresponde ao Modelo Digital de Superfícies ou de Elevações da zona 1a, gerado pela ferramenta *GridsurfaceCreate* do FUSION.

Figura 15: Modelo Digital de Superfícies da zona 1a.



A área de estudo apresenta 315,29m de altura, estando o seu ponto mais alto a 2135,46 metros de altitude ao nível do mar.

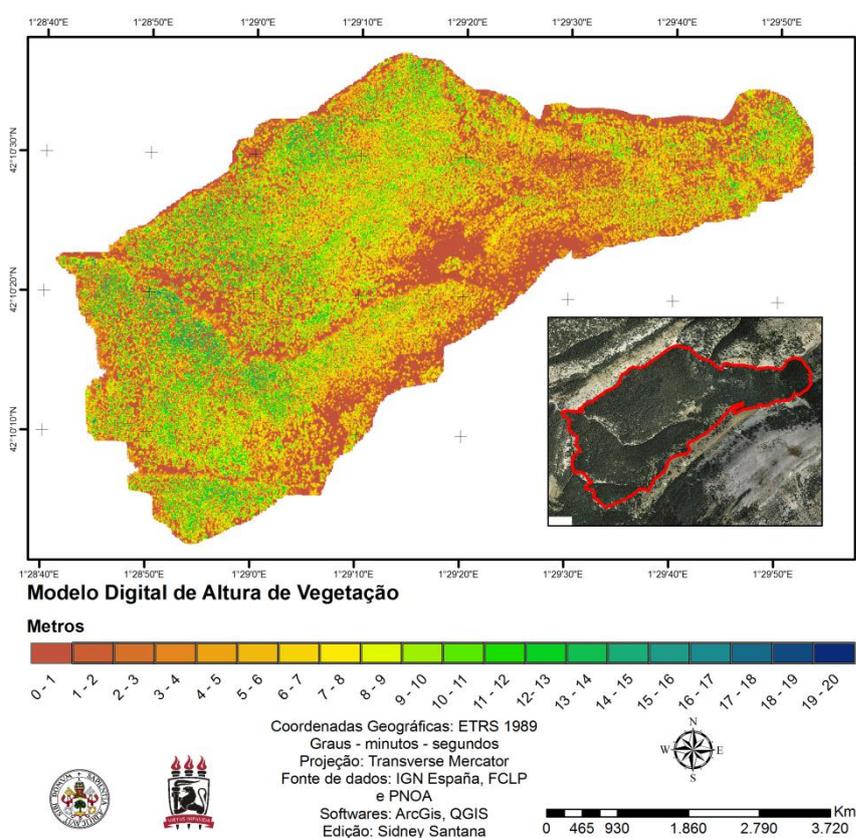
Por meio do matiz de cores com valores de altitude correspondentes, como mostra a legenda da Figura 10, se observa que a porção oriental compreende a porção mais elevada da zona 1a, representada pela cor marrom. Os valores altitudinais decrescem no sentido oeste, sendo os níveis mais baixos representados pela cor rosa clara. Constata-se, dessa forma, que a zona 1a compreende a uma área de encosta voltada ao sentido ocidental.

Ao observar o MDS e a ortofotografia percebe-se que a zona 1a é cruzada, longitudinalmente, por um vale em sua porção central. Da mesma forma, percebe-se que na porção sul outro vale transpassa a zona.

5.2.2 Modelo de dossel

A Figura 11, corresponde ao Modelo Digital de Altura de Vegetação, ou modelo de dossel, da área de estudo criado pela função *CanopyModel* do FUSION.

Figura 16: Modelo Digital de Altura de Vegetação da Zona 1a.



Tomando como referência a gradação de cores correspondentes às alturas de vegetação, percebe-se na Figura 11 que as concentrações das massas mais altas de vegetação estão distribuídas aparentemente em quatro porções: na porção extrema ao nordeste da zona, na porção central ao norte do vale (mencionado no tópico anterior), na porção central ao sul do vale, e na porção correspondente ao extremo sul da zona. Os níveis mais baixos de altura se encontram ao longo dos talvegues dos dois vales que atravessam a zona, e na porção leste, onde estão as mais altas cotas altimétricas.

Ao se comparar o Modelo de Dossel com a ortofotografia do sítio (Figura 7) é possível observar uma relação entre estes produtos, porém, além de especificar os valores de altura, o

modelo fornece maior detalhe visual da área por meio da classificação por cores de toda a massa florestal. Neste sentido Riaño *et al.* (2004) afirma que os níveis de detalhe com os sensores LiDAR aerotransportados são realmente espetaculares, posto que se alcança uma descrição muito detalhada da estratificação vertical da vegetação.

5.3 Cálculos dos modelos estatísticos baseados nos dados LiDAR.

A princípio, foram realizados testes com modelos lineares com todos os 60 pontos das zonas 1a, 1b, 1c, 1d e 3c, porém, as correlações não resultaram satisfatórias, atingindo valores de R quadrado de 0,5 em média. Então, foram realizados novos testes, ora excluindo uma zona por vez, ora considerando os pontos de duas zonas. Neste processo, buscou-se sempre incluir a zona 1a, por esta ser objeto deste estudo.

Finalmente ao gerar modelos com os pontos da zona 1a e 1d, atingiu-se um valor de R quadrado de 0,82, com alto grau de significância na maioria dos parâmetros. Com a “união” dos pontos destas duas zonas, foram totalizadas 29 parcelas circulares.

A Figura 14 se refere ao modelo criado para estimar a biomassa florestal.

Figura 17: Modelo de regressão linear múltipla gerado para estimar a biomassa florestal.

```
Call:
lm(formula = Biomassa_Invent. ~ Elev.mean + FCC + Elev.kurtosis +
    Elev.P70 + Elev.P50 + Elev.P95 + Elev.P05 + Elev.P75 + Elev.P90 +
    Elev.P01 + All.returns.above.mean + Canopy.relief.ratio,
    data = biomassa_teste)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-1.2567 -0.3069  0.1251  0.3840  1.0158

Coefficients:
                Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)    -8.420533   4.926467  -1.709  0.106726
Elev.mean      -17.284783   4.211774  -4.104  0.000830 ***
FCC              0.090872   0.018674   4.866  0.000172 ***
Elev.kurtosis   3.321942   0.903605   3.676  0.002042 **
Elev.P70        4.383122   2.064136   2.123  0.049660 *
Elev.P50        3.582299   1.739309   2.060  0.056092 .
Elev.P95       -1.322206   0.845324  -1.564  0.137346
Elev.P05        4.407623   0.981456   4.491  0.000370 ***
Elev.P75        3.959646   1.570479   2.521  0.022680 *
Elev.P90        2.871198   1.062552   2.702  0.015702 *
Elev.P01       -1.757112   1.127100  -1.559  0.138563
All.returns.above.mean  0.002919   0.001632   1.789  0.092611 .
Canopy.relief.ratio  6.719745   5.281650   1.272  0.221453
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.7532 on 16 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.825, Adjusted R-squared:  0.6937
F-statistic: 6.285 on 12 and 16 DF,  p-value: 0.0004886
```

Fonte: R software

Os estatísticos utilizados neste modelo estão definidos no Anexo 3. A pré-seleção das variáveis, concordando com Hudack *et al.* (2012), é um procedimento essencial de modelagem estatística, o que garante uma maior confiabilidade durante a ‘pré-construção’ do modelos. Em seus estudos, Hudack *et al.* (2012) realizaram o teste de correlação linear de Pearson para construir modelos para estimar o carbono na biomassa.

Nos estudos de Zhao *et al.* (2009), Salas *et al.* (2010) e Zolkos *et al.* (2013), os métodos de regressão foram eficazes para modelagem de biomassa com as métricas derivadas dos sensores aerotransportados. Nesses casos as equações alométricas foram utilizadas para relacionar medições de biomassa florestal em campo com características físicas das árvores fornecidas pelos dados LiDAR.

Entretanto, na tentativa de entender o motivo pelo qual as correlações anteriores não resultaram altas, lançou-se a hipótese de que a biomassa florestal das zonas 1a e 1d poderia estar mais relacionada às alturas das árvores, já que os dados fornecidos pelo LiDAR são em sua grande maioria referentes à elevação. Ao contrário, os valores de biomassa das demais zonas poderiam estar associados à quantidade de árvores por parcela. Por isso, foram calculadas as médias dos valores de biomassa do inventário, e de elevação máxima gerada pelos dados LiDAR, e logo, comparados entre si (Tabela 1).

Tabela 1: Média dos valores de biomassa e elevação máxima por zona.

Zona	Biomassa Florestal	Elevação Máxima
1a	6,87 ton	14,36 m
1b	5,22 ton	11,00 m
1c	4,89 ton	12,16 m
1d	6,31 ton	13,92 m
3c	9,04 ton	16,03 m

Observa-se na Tabela 1 que das zonas pertencentes ao grupo 1, as zonas 1a e 1d apresentam valores mais altos nas médias de biomassa e elevação máxima. Entretanto, a zona 3c é a que obtém uma maior quantidade em biomassa florestal e a mais alta vegetação, de acordo com os dados LiDAR. Dessa forma, tendo em vista que os testes com a zona 3c não resultaram em uma correlação satisfatória, a hipótese lançada é posta em cheque.

Uma vez determinado o modelo linear da biomassa florestal das zonas 1a e 1d, para estimar a área basal e o teor de carbono, foram utilizados modelos similares, tendo em vista que a correlação para esses outros três parâmetros resultou igualmente satisfatória, com uma média de R^2 de 0,82.

A partir desses modelos foram montadas equações no Microsoft Excel para estimar a área basal, biomassa florestal e teor de carbono de todos os 29 pontos considerados nesta etapa.

A Tabela 2 apresenta equações 1, 2 e 3 resultantes das regressões lineares realizadas entre os dados de área basal, biomassa florestal e teor de carbono dos do inventário com os dados adquiridos pelo LiDAR.

Tabela 2: Equações para estimar os parâmetros florestais e suas respectivas correlações.

Modelo de Área Basal	
<i>Correlações</i>	<i>Equação 1</i>
Erro padrão residual = 0,190	Area basal = -2,3052169 + (0,9240385 * Elev. Kurtosis) -
R quadrado múltiplo = 0,816	(4,8732819 * Elev. mean) - (0,2282890 * Elev. P01) +
R quadrado ajustado = 0,679	(1,0594169 * Elev. P05) + (1,1625501 * Elev. P50) +
	(1,3399587 * Elev. P70) + (0,8601445 * Elev. P75) +
	(0,8235293 * Elev. P90) - (0,3479112 * Elev. P95) +
	(0,0216396 * FCC) + (0,0007670 * All returns above mean) +
	(1,4291118 * Canopy relief ratio)
Modelo de Biomassa Florestal	
<i>Correlações</i>	<i>Equação 2</i>
Erro padrão residual = 0,753	Biomassa florestal = -8,420533 - (17,284783 * Elev. mean)
R quadrado múltiplo = 0,825	+ (0,090872 * FCC) + (3,321942 * Elev. Kurtosis) +
R quadrado ajustado = 0,693	(4,383122 * Elev.p70) + (3,582299 * Elev.p50) - (1,322206
	* Elev.p95) + (4,407623 * Elev.p05) + (3,959646 *
	Elev.p75) + (2,871198 * Elev.p90) - (1,757112 * Elev.p01)
	+ (0,002919 * All returns above mean) + (6,719745 *
	Canopy relief ratio)
Modelo de Teor de carbono	
<i>Correlações</i>	<i>Equação 3</i>
Erro padrão residual = 0,389	Teor de carbono = -4,5731132 + (1,8312510 * Elev.
R quadrado múltiplo = 0,817	Kurtosis) - (9,6776788 * Elev. mean) - (0,5139935 * Elev.
R quadrado ajustado = 0,680	P01) + (2,1626610 * Elev. P05) + (2,2162177 * Elev. P50)
	+ (2,7347885 * Elev. P70) + (1,7112347 * Elev. P75) +
	(1,7414060 * Elev. P90) - (0,7976353 * Elev. P95) +
	(0,0450736 * FCC) + (0,0015026 * All returns above mean)
	+ (2,9105467 * Canopy relief ratio)

Ao fazer uma leitura da Tabela 2 nota-se que tanto os valores de R quadrado quanto os de R quadrado ajustado das três variáveis resultaram próximos, sendo maiores para a biomassa florestal, 0,825 e 0,693 respectivamente. Resultados semelhantes entre as correlações dos cálculos alométricos em relação à biomassa foram obtidos por Estornell *et al.* (2012), em que obtiveram o R quadrado de 0,87 e R quadrado ajustado de 0,79 na zona do mediterrâneo.

Na Tabela 3 estão contidos os valores das variáveis florestais do inventário e os valores estimados pelas equações, referentes à biomassa florestal, área basal e teor de carbono.

Tabela 3: Valores biométricos do inventário e os resultantes dos cálculos com o LiDAR.

Pontos das zonas	Biomassa	Biomassa	Área	Área	Estoque	Estoque
	Florestal	Florestal	Basal	Basal	Carbono	Carbono
	Inventário	Modelo	Inventário	Modelo	Inventário	Modelo
1a1	8,53	8,33	2,16	2,21	4,40	4,49
1a2	5,93	6,02	1,57	1,63	3,30	3,37
1a3	7,82	6,98	2,11	1,90	4,28	3,84
1a4	6,00	6,53	1,65	1,72	3,34	3,51
1a5	7,60	7,26	2,06	1,97	4,16	3,98
1a6	4,81	5,08	1,35	1,45	2,73	2,92
1a7	6,65	7,39	1,80	2,00	3,67	4,06
1a8	5,98	6,68	1,64	1,84	3,33	3,76
1a9	7,38	8,29	1,98	2,28	4,05	4,62
1a10	4,71	4,00	1,32	1,19	2,68	2,42
1a11	6,37	5,92	1,73	1,70	3,53	3,44
1a12	8,34	7,32	2,22	2,03	4,54	4,15
1a13	9,16	8,69	2,44	2,31	4,97	4,69
1d2	5,90	6,20	1,71	1,77	3,46	3,58
1d3	6,26	5,72	1,80	1,63	3,65	3,28
1d4	4,26	5,51	1,31	1,58	2,61	3,18
1d5	4,00	4,51	1,24	1,38	2,48	2,76
1d6	8,31	8,59	2,31	2,34	4,71	4,74
1d7	4,96	4,97	1,48	1,47	2,98	2,95
1d8	5,74	6,72	1,68	1,90	3,38	3,86
1d9	5,82	5,43	1,68	1,54	3,42	3,10
1d10	6,30	5,77	1,81	1,62	3,67	3,31
1d11	8,79	8,55	2,45	2,36	4,95	4,79
1d12	6,89	6,77	1,97	1,92	3,97	3,88
1d13	6,64	6,38	1,90	1,79	3,84	3,63
1d14	7,92	7,76	2,22	2,11	4,51	4,31
1d15	6,05	6,01	1,57	1,61	3,12	3,22
1d16	7,14	6,77	2,04	1,98	4,10	3,99
1d17	6,03	6,17	1,76	1,74	3,53	3,51

Observa-se na Tabela 3 que os valores resultantes das equações com os dados LiDAR se aproximam dos valores das variáveis florestais fornecidos pelo Inventário da Fundação *La-Pedreira*. Para averiguar essa correlação foram gerados gráficos de dispersão entre os valores

(por parcela) das variáveis provenientes do inventário e os gerados pelo modelo estatístico aplicado sobre os dados LiDAR (Figuras 18, 19 e 20).

Figura 18: Correlação entre os valores de área basal do inventário e os resultantes dos produtos LiDAR.

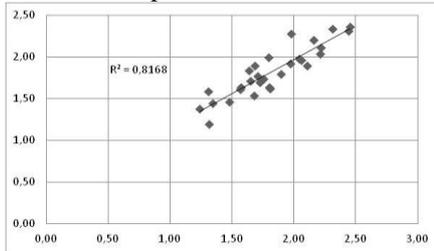


Figura 19: Correlação entre os valores de biomassa florestal do inventário e os resultantes dos produtos LiDAR.

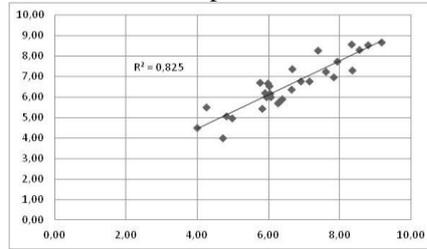
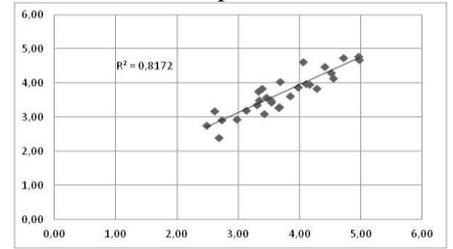


Figura 20: Correlação entre os valores de teor de carbono do inventário e os resultantes dos produtos LiDAR.

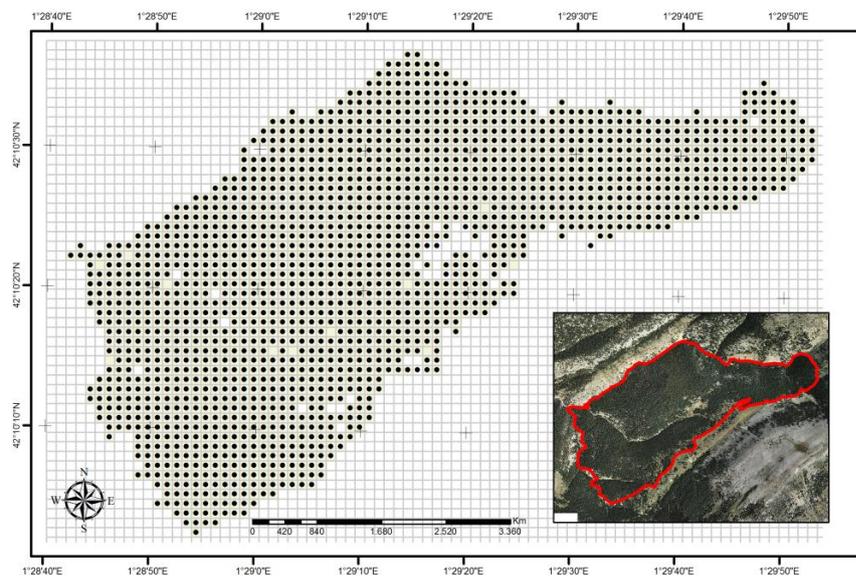


Nas Figuras 18, 19 e 20 se nota que as correlações entre os valores inventariados de área basal, biomassa florestal e teor de carbono e os resultantes dos modelos aplicados apresentam uma boa correlação, 0,817, 0825 e 0,817 respectivamente. Dessa forma, a biomassa florestal é a variável que apresenta maior correlação entre os dados, enquanto que a área basal e o teor de carbono apresentam os resultados de R quadrado bastante aproximados.

5.4 Estimativa das variáveis florestais.

Na Figura 21 se observa a malha de quadrículas geradas no QuantumGIS. Nas células situadas na área de estudo estão os pontos com as informações das variáveis LiDAR geradas pelo GridMetrics.

Figura 21: Quadrículas e pontos com os dados florestais geradas no QuantumGIS.



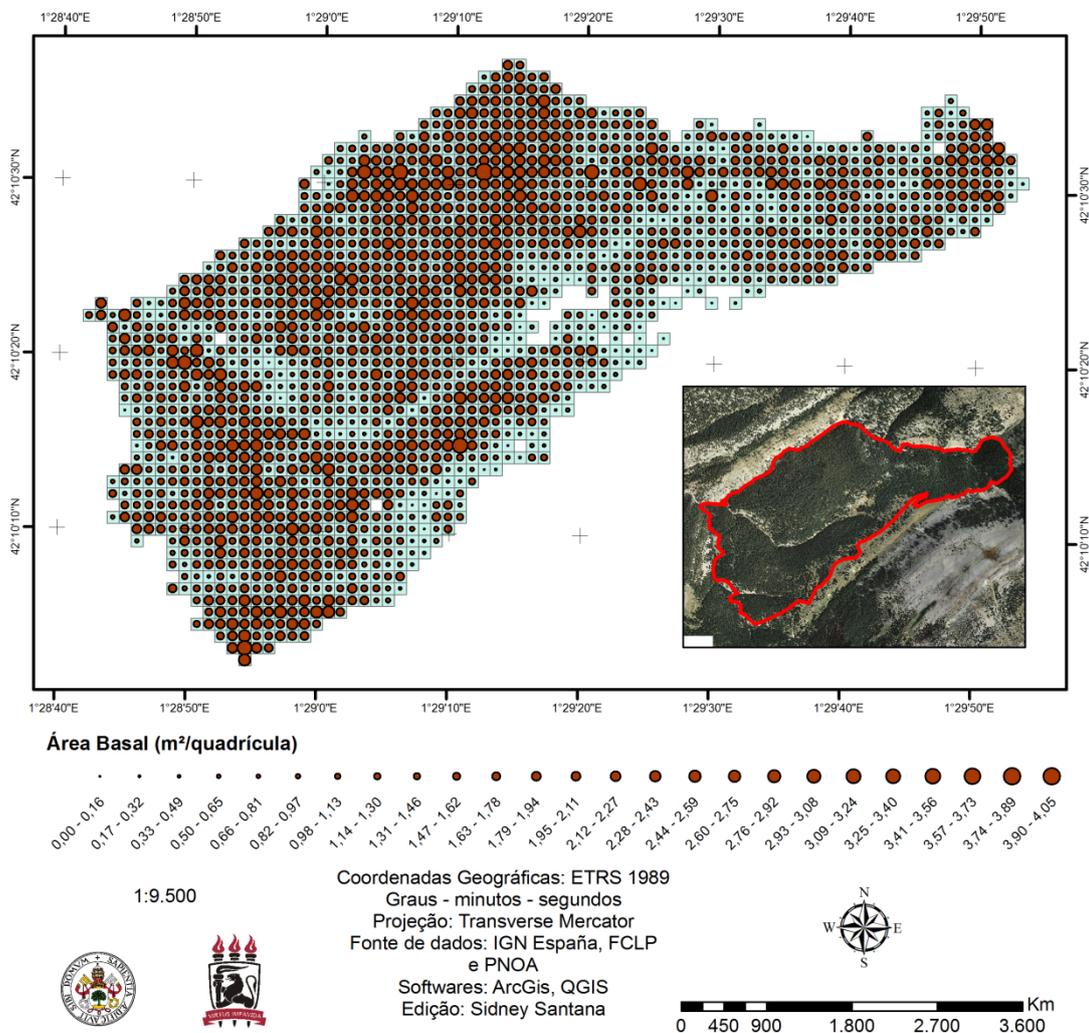
Cada célula apresenta uma dimensão de 400 m², e nas que fazem parte da zona 1a, foram aplicadas as equações para estimar a biomassa florestal, a área basal e o teor de carbono.

5.4.1 Área basal.

A área basal corresponde à área em metros quadrados do corte transversal de uma árvore a altura do peito, 1,30 m. Consequentemente, o valor da área basal em um quadrante delimitado corresponde à soma dos valores de área basal de todas as árvores presentes nele.

Na Figura 22 está representado o mapa de área basal da área de estudo, assim como a biomassa florestal, os valores se apresentam por célula.

Figura 22: Valores totais de Área basal por quadrícula na zona 1a.



Observa-se na Figura 22 que os maiores valores de área basal se estendem pela porção central norte da zona, mesmo que variadamente. Na porção ao sul também se nota medidas significativas de área basal, assim como ao extremo sul da zona. Observa-se também, que a nordeste da zona, ao entorno das coordenadas $1^{\circ} 29'50''$ E e $42^{\circ}10'30''$ N, se concentram valores expressivos de área basal.

O mapa que representa a distribuição da área basal pela zona de estudo, naturalmente, apresenta similaridade com o mapa de biomassa florestal, sendo as maiores dimensões de área basal distribuídas nas áreas onde existem as altas concentrações de biomassa, tanto por quantidade quanto por tamanho das árvores.

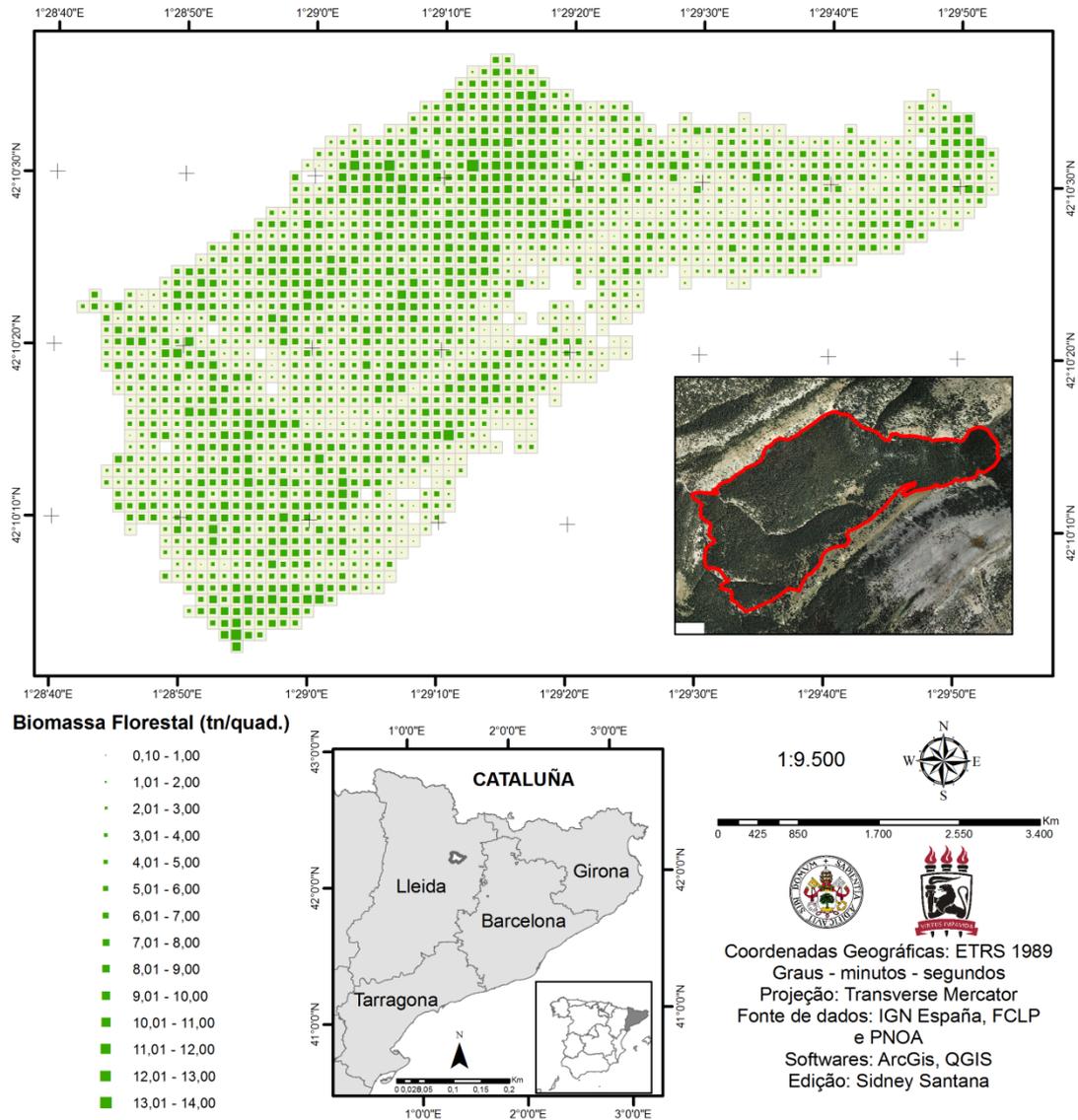
5.4.2 Biomassa florestal

Na zona 1a, excluindo as que apresentaram erros, existem 1.727 células que equivalem a 69,08 ha de área. Tomando essa dimensão como referência, e considerando as parcelas do inventário como amostras, foi estimada a biomassa florestal total da área, utilizando os dados da fundação *La-Pedreira*. O cálculo resultou em um valor de 11.638,4 ton de biomassa florestal para a zona. Em contrapartida, o cálculo da biomassa total da área por meio da equação aplicada aos dados LiDAR resultou em 9.138,6 ton de biomassa florestal.

Ao se comparar os dois valores de biomassa floresta total da área de estudo, nota-se que são valores aproximados, cujo valor obtido pelo modelo é resultou inferior, 2.499,8 ton a menos. Estima-se que esta diferença é consequência de que o método utilizado para calcular a biomassa da zona tomando como amostras as parcelas inventariadas, inclui partes do bosque onde as árvores são menores e até mesmo espaços onde não há vegetação arbórea, como foi possível observar no modelo de dossel. Desta maneira se ressalta a importância dos dados LiDAR na projeção mais confiável do objeto de estudo, visto que o sensor capta informações de toda a zona, com diferente cobertura vegetal, enquanto que as parcelas do inventário servem como amostras, tendendo a homogeneizar as informações sobre o espaço considerado

Portanto, na Figura 23 se apresenta o mapa da distribuição da biomassa florestal por quadrícula em toda na área de estudo.

Figura 23: Valores totais de biomassa florestal por quadrícula na zona 1a.



Ao analisar a Figura 22, nota-se que as altas concentrações de biomassa florestal não se condensam em uma região da zona, mas se distribuem em várias partes. Um alto teor de biomassa florestal se estende pela porção central norte da zona, ainda que não ocorra de modo uniforme. Na porção ao sul do vale que divide a zona de 1a, também se observa uma distribuição de biomassa adensada, e ao extremo sul da zona, se nota um adensamento mais concentrado desta biomassa florestal. É possível perceber, também, que a nordeste da zona, ao entorno das coordenadas $1^{\circ} 29' 50''$ E e $42^{\circ} 10' 30''$ N, existe uma concentração de biomassa florestal. Nas áreas correspondentes aos talvegues dos vales, que cruzam as porções central e sul da zona, se nota a ausência considerável de biomassa florestal. Isto pode ser ocasionado por conta da estrutura pedológica nestas áreas, com acúmulos de detritos rochosos carreados por agentes naturais somados à ação da gravidade.

Observa-se, também, a pouca concentração de biomassa entre a porção central norte e a nordeste da zona, incluindo as áreas mais altas do sítio, o que pode ser causado pelo solo raso e afloramentos rochosos, que dificultam o desenvolvimento de vegetação de grande porte. Ao observar a ortofotografia (Figura 7), nota-se a presença de afloramentos rochosos próximos da zona, a leste.

5.4.3 Teor de carbono

A aplicação da equação para estimar o teor de carbono para a zona 1a resultou numa malha com 1.762 quadrículas, correspondendo a 400m² cada uma delas. Dessa forma, essa malha equivale a 70,48 ha de área para a zona de estudo, pois o número de quadrículas com valores errôneos foi menor que o número de células rompidas no cálculo da biomassa florestal.

Portanto, sobre essa dimensão foi calculado o teor de carbono com os dados fornecidos pelo inventário, tomando como amostras as parcelas circulares inventariadas. Este cálculo resultou em 6.520,18 ton de conteúdo de carbono na biomassa florestal.

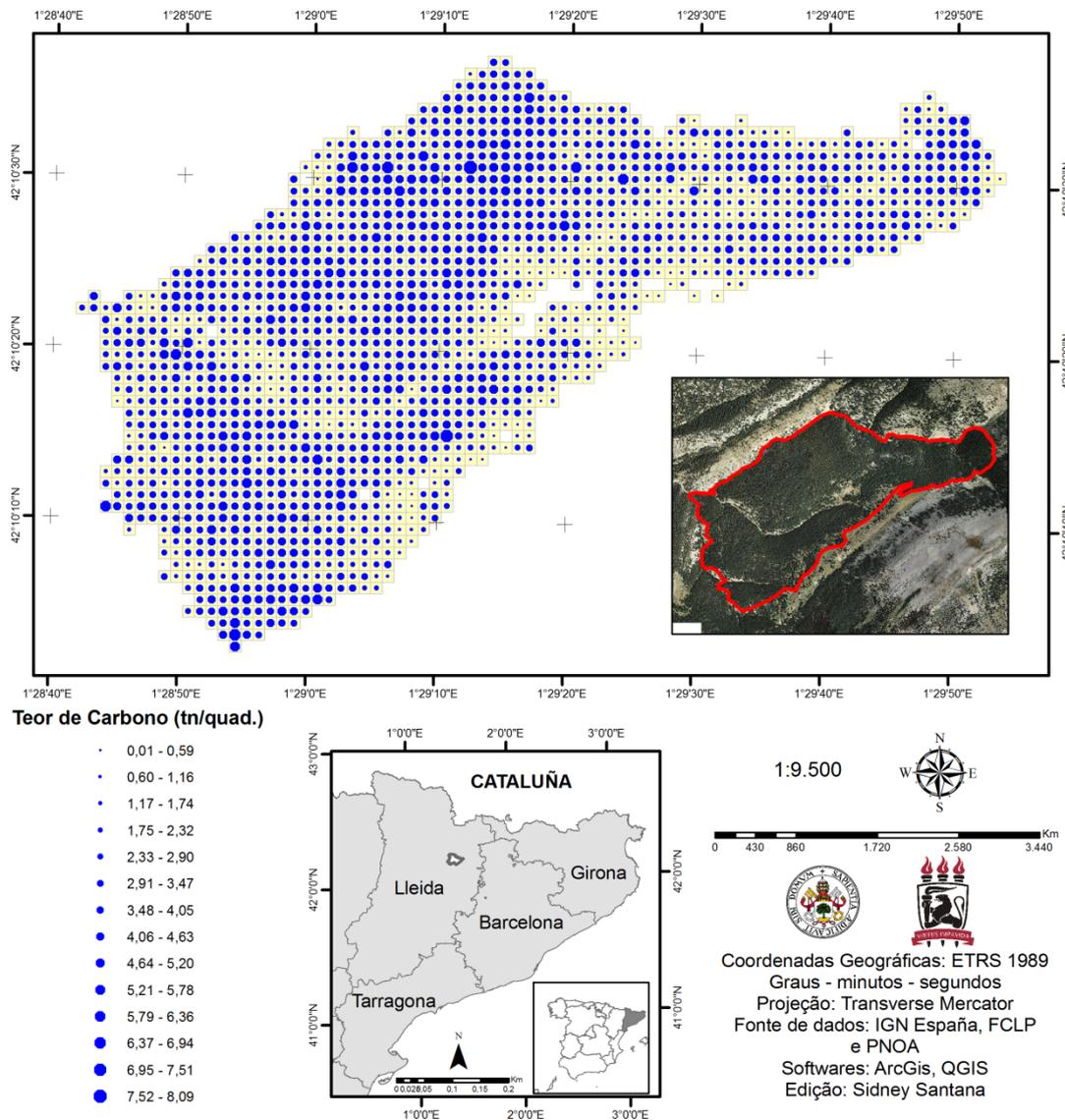
Por outro lado, a aplicação da equação sobre os dados LiDAR para estimar o teor de carbono na área de estudo resultou em 5.425,04 ton, valor mais baixo que o resultante da estimativa pelos dados do inventário. Essa diferença se dá pelo mesmo motivo da ocorrida com os cálculo de biomassa florestal, 1.095,14 ton a menos.

Percebe-se também que o conteúdo de carbono estimado por meio dos dados de LiDAR corresponde a 59,37% da biomassa florestal da zona. Vale ressaltar que o número de células consideradas nesta estimativa é maior que a quantidade de células utilizadas para estimar a biomassa florestal. São 35 células a mais, equivalentes a 1.400 ha. Se a quantidade de células dessas duas variáveis equivalesse, essa porcentagem seria menor.

Neste sentido, a madeira é constituída de 50% de carbono, 43% de oxigênio, 6% de hidrogênio e 1% de nitrogênio e uma fração de outros elementos minerais (KLOCK *et al.* 2005, IPCC, 1996; AMAZONAS, 2009). De acordo com Marklund; Schoene (2006), a fração do teor de carbono na biomassa varia entre 45% e 53% dependendo da espécie, no entanto, um valor padrão de 50% é normalmente aplicada. Enquanto que nos estudos de Montero *et al.* (2005) o teor de carbono para a biomassa pinheiro preto (*Pinus nigra*) foi de 50,9%, enquanto que para o zimbro espanhol (*Juniperus communis*) e para a azinheira (*Quercus ilex*) o teor de carbono foi estimado em 47,5% da biomassa total.

Portanto, a Figura 24 corresponde à distribuição de teor de carbono na zona 1^a por quadrículas.

Figura 23: Valores totais de Teor de carbono por quadrícula na zona 1a.



Ao observar a Figura 24 observa-se que a distribuição espacial do teor de carbono na área de estudo se assimila com a disposição da biomassa florestal na zona.

Conforme Andrae (1978), o maior porcentual de C concentra-se no tronco e aumenta à medida que este envelhece. Por isso, mensurações tomadas a partir do diâmetro à altura do peito (DAP) providenciam boas estimativas de biomassa e de carbono florestal (GIFFORD, 2000).

5.5 Biomassa florestal vs NDVI

As Figuras 25 e 26, respectivamente, correspondem à representação espacial da biomassa florestal da área de estudo resultante da equação aplicada nos dados LiDAR e a representação espacial do NDVI na zona. Ambos os produtos têm seus dados originados no ano de 2011.

Figura 24: Distribuição da biomassa florestal na área de estudo.

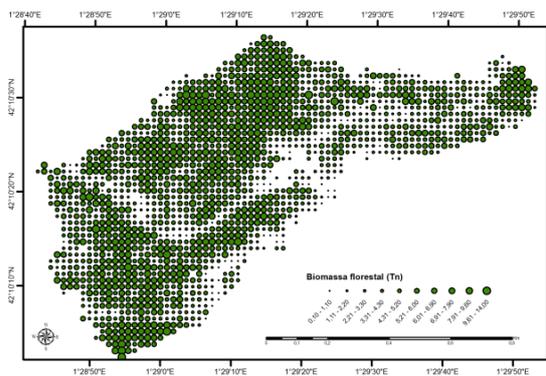
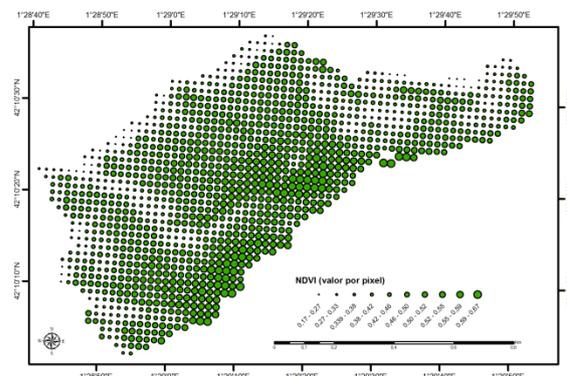


Figura 25: Distribuição dos valores de NDVI na área de estudo.



Ao observar as Figuras 25 e 26, nota-se certa similaridade nas representações da biomassa florestal e o NDVI. Esta semelhança poderia ser maior sem a influência dos efeitos topográficos sobre o índice de vegetação. Neste sentido, ao se analisar conjuntamente a ortofotografia da área (Figura 8), o MDE (Figura 15) e o modelo de dossel (Figura 16) e a distribuição da biomassa na zona de estudo (Figura 22), junto ao NDVI, nota-se que por influência do relevo os valores mais altos do índice se encontram nas cotas altimétricas mais altas da área (justamente onde o efeito da sombra é menor). Devido a isso, nas altitudes menores da área, os valores do NDVI também decrescem.

Ademais, o sensor TM do Landsat 5, além de multiespectral, apresenta uma resolução espacial de 30 metros em nível de pixel, oferecendo menos detalhes sobre os elementos terrestres imageados. Neste sentido Hyde *et al.* (2007) e Anderson *et al.* (2008) demonstraram que os dados LiDAR apresentam mais utilidade na predição da biomassa que os sensores hiperspectrais, que têm maior resolução espectral que os sensores multiespectrais.

Entretanto, mesmo com a influência dos efeitos topográficos, o NDVI se mostrou uma boa ferramenta de apoio ao estudo da biomassa, proporcionando a realização de uma análise histórica do comportamento da massa florestal em estudo. Além disso, estudos que associam o NDVI a dados de inventário e variáveis de LiDAR, vem sendo realizados por

pesquisadores. Meng *et al.* (2007) construíram modelos estatísticos que relacionam o NDVI com os dados de biomassa e volume, e constatou que os modelos gerados mostram a variação na correlação entre biomassa e volume de acordo com a distribuição espacial das árvores nos bosques do Estado de Geórgia nos Estados Unidos.

Entretanto, a eficiência nos detalhamentos sobre os estudos de biomassa florestal depende de suporte de uma base de dados prévia, volume, altura, entre outros. Por isso é fundamental a realização de inventários florestais. Infortunadamente, o Brasil ainda carece de uma ampla base de dados florestais com informações precisas e atualizadas. Além disso, ferramentas de sensoriamento remoto de alta precisão são pouco disponibilizadas no meio científico.

No Brasil, a utilização da tecnologia LiDAR aerotransportado ainda é recente, porém alguns trabalhos desenvolvidos por Rodriguez *et al.* (2010), Zonete *et al.* (2010), Zandoná (2006) e Macedo (2009) demonstram o grande potencial da tecnologia aerotransportada para estimativas de parâmetros biométricos em povoamentos florestais. Com isso, a aprendizagem da técnica que foram aplicados neste estudo servirá para futuros estudos realizados nas florestas brasileiras. Dessa forma, a expectativa é que as estimativas de biomassa florestal dos biomas brasileiros se tornem mais precisas.

Neste contexto o Estado de Pernambuco está sendo mapeado com a tecnologia LiDAR pelo Programa Pernambuco Tridimensional do Governo de Estado. A estimativa é que no ano de 2016 as cenas com as nuvens de pontos “las” esteja disponibilizada a instituições científicas. Portanto, se torna mais concreto o objetivo de estimar a biomassa florestal dos ecossistemas de Pernambuco.

Contudo as características das florestas de Pernambuco, e do Brasil, são, de maneira geral, distintas dos bosques espanhóis, e dos demais bosques temperados. Logo, se fazem necessárias investigações mais aprofundadas a respeito das ferramentas de LiDAR, com a finalidade de adequar esta tecnologia aos estudos dos biomas brasileiros.

6 CONCLUSÃO

Os índices de vegetação sofreram influência dos efeitos topográficos, prejudicando os seus resultados. O SAVI foi mais susceptível que o NDVI por apresentar maior sensibilidade a esses efeitos, apresentando incoerência na sua projeção em relação aos demais produtos gerados. Ainda com interferência do relevo, o NDVI corroborou o estudo no que se refere à análise temporal da situação do fragmento florestal de *Pinus uncinata*.

O Modelo Digital de Superfícies foi essencial para o desenvolvimento do estudo, pois só foi possível realizar os cálculos das variáveis do LiDAR após separar a vegetação do solo. Além disso, o MDS serviu como parâmetro de comparação com os demais produtos no momento de análise da massa florestal. Da mesma forma, o modelo de dossel se mostrou como um produto viável para se analisar a estrutura da massa florestal, visto que diferencia, claramente, os valores de altura entre as árvores.

A bateria de estatísticos oriundos dos produtos LiDAR apresentou uma correlação satisfatória com os dados do Inventário Florestal para as 29 parcelas das zonas 1a e 1d, com valores de R quadrado acima de 0,8. Dessa forma possibilitaram a criação da equação para estimar a biomassa florestal em toda a área de estudo. Neste sentido, os modelos obtidos fornecem informações mais completas e precisas da zona de estudo.

Como consequência, os produtos cartográficos apresentaram um bom resultado, visto que mostraram coerência entre si, com a ortografia e com o modelo de dossel. Além disso, projetaram informações específicas sobre as variáveis florestais na zona de estudo.

O NDVI apresentou certa coerência com a distribuição da biomassa florestal na zona, ainda que sem muita precisão, por tratar-se de um produto oriundo de um sensor orbital com média resolução espacial, e que sofreu influência dos efeitos topográficos.

O estudo com os dados LiDAR se mostrou vantajoso por trabalhar com medidas biométricas não destrutivas (questão crucial diante da problemática ambiental vivida no planeta). Além disso, as ferramentas de sensoriamento remoto propiciaram diagnósticos rápidos, práticos e menos custosos, que foram fundamentais para a quantificação da biomassa florestal e o teor de carbono em larga escala. Esse processo é necessário para apoiar medidas estratégicas de mitigação dos efeitos das mudanças climáticas na Terra, em curto prazo.

Contudo, os métodos de aplicação dos dados LiDAR precisam ser desenvolvidos para se adequar à realidade diversificada dos biomas e florestas brasileiros. Somado a isso, existe a necessidade de uma ampla base de dados padronizada sobre as massas florestais do Brasil.

REFERÊNCIAS

ALDWIN, M.E.; MATTHEWS, R.W. **Integrating Data for the Construction of Forest Growth and Yield Models: An Example Based on Even-Aged Stands of Ash (*Fraxinus excelsior* L.). Statistics and Modelling Theme.** Sustainable Forestry in Theory and Practice. USDA. ISBN 978-9789478-0-4. 2005.

ALMEIDA, A.C. *et al.* **Estimation of Above-ground Forest Biomass in Amazonia with Neural Networks and Remote Sensing.** IEEE Latin America Transactions, v. 7, n. 1. p. 27-32. 2009.

ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, G. *et al.* **National Forest Inventory and forest observational studies in Spain: Applications to forest modeling.** Forest Ecology and Management, v. 316. 54-64. 2014.

ALVES, L.F. *et al.* **Forest structure and live aboveground biomass variation along an elevational gradient of tropical Atlantic moist forest, Brazil.** For. Ecol. Manage., 260. p. 679–691. 2010.

AMARAL, A. **Application of the Forest Growth Model 3PG to Eucalyptus globules Stands in the Central Region of Portugal. Statistics and Modelling Theme.** In: Sustainable Forestry in Theory and Practice. USDA. ISBN 978-9789478-0-4. 2005.

AMAZONAS. **A floresta amazônica e seu papel nas mudanças climáticas.** Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Manaus: SDS/CECLIMA. Governo do Estado. 2009.

ANDRAE, F. **Ecologia florestal.** Santa Maria: UFSM – DCFL. p. 278. 1978.

ARAÚJO, M.B., *et al.* **Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación al Cambio Climático de la Biodiversidad Española. Fauna de Vertebrados.** Dirección general de medio Natural y Política Forestal. 2011.

BARROS, J. R.; ZAVATTINI, J. A. Bases conceituais em climatologia geográfica. Mercator - **Revista de Geografia da UFC**, v. 08, n. 16, p. 255-261.2009.

BASTIAANSEN, W. G. M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain.** Ph.D. Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, p. 273.1995.

BATISTELLA, M. MORAN, E. F. **Uma Heterogeneidade das Mudanças de Uso e Cobertura das Terras na Amazônia: Em busca de um Mapa da Estrada de Dimensões Humanas da Biosfera-Atmosfera na Amazônia.** (Costa, WM, Becker, BK & Alves, DS, eds), Edusp - Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo / SP. p. 65-80. 2007.

BENGTSSON, G. The Swedish National Forest Survey. In: NATIONAL FOREST INVENTORY - Joint Meeting of IUFRO Groups: S4 02 - Forest Resource Inventory and S4 04 - **Forest Management Planning and Managerial Economics.** Proceedings. Bucharest : IUFRO, p.691-699. 1978.

BOMBELLI, A. *et al.* **An outlook on the Sub-Saharan Africa carbon balance.** Biogeosciences, 6, p. 2193–2205, 2009.

BOYD, D.S.; DANSON, F.M.. **Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development.** Prog. Phys. Geo. 29, 1 1-26. 2005.

BRAVO, F.; *et al.* El diseño de las parcelas del inventario forestal nacional y la estimación de variables dasométricas. In: BRAVO F, RÍO M, PESO C (Eds.) **El Inventario Forestal Nacional. Elemento clave para la gestión forestal sostenible.** MAM, UVA, Madrid, 9-18.2002.

BROWN, S. **Measuring, monitoring, and verification of carbon benefits for forest based projects.** Philosophical Transactions of the Royal Society. v. 360. p. 1669- 1683. 2002.

BROWN, S.; GILLESPIE, A.J.R.; LUGO, A.E. **Biomass estimation methods for tropical forest with applications to inventory data.** Forest Science, Maryland, v. 35, n. 4, p. 881-902. 1989.

CAMARERO, J. J. Bosques montanos y subalpinos de *Pinus uncinata* (en sustratos yesosos o calcáreos). In: VV.AA., **Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España.** Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino. 64 p. 2009.

CANADELL, J. **L'anaJisi dimensional com a metode de predicció de la biomassa d'un bosc.** In: El medi natural del Valles. Annals del CEEM 2. ADENC-CEEM (eds), Sabadell. Pp: 51-56. 1990.

CANADELL, J.G.; M.R. RAUPACH. **Future of the terrestrial carbon sink.** Richardson KS, WL Steffen, D Liverman (ed). En: Climate Change: Global Risks, Challenges and Decisions. Cambridge University Press. Cambridge, United Kindom. p. 90-91. 2011.

CANTEGREL, R. **Le Pin à crochets pyrénéen: biologie, biochimie, sylviculture.** Acta Biologica. Montana 2-3: 87-330. 1983.

CASTILHO, C.V. de, *et al.* **Variation in aboveground tree live biomass in a central Amazonian Forest: effects of soil and topography.** For. Ecol. Manage., 234.p. 85–96. 2006.

CENTENO, J.; MITISHITA, E. **Laser Scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR.** SBSR, INPE, 2007.

CHORLEY, R. J; HAGGETT, P. (ed.). **Models in Geography.** London, Methuen, 1967.

CUASANTE, D.; GARCÍA, C. **Estimación de recursos forestales con tecnología LIDAR aerotransportada. Aplicación práctica en varios montes de la Provincia de Burgos.** En: Actas del 5º Congreso Forestal Español. Volumen 1. REF.: 5CFE01-544. S.E.C.F.; Junta de Castilla y León. 2009.

Directiva 2001/77/CE - Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001, relativa a la promoción de la electricidad generada a partir de fuentes de energía renovables en el mercado interior de la electricidad. Disponible em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV:l27035#amendingacts> - Acesso em: 20 de Julho de 2015.

DUBAYAH, R.O., DRAKE, J.B. LiDAR remote sensing for forestry. **J. Forest.** 98, 44–46. 2000.

ENERSILVA. **Projecto Europeu de Cooperação Transregional.** 2007.

ESTORNELL, J.; *et al.* **Estimation of biomass and volume of shrub vegetation using LiDAR and spectral data in a Mediterranean environment.** *Biomass & Bioenergy*, Oxford, v. 46, p. 710-721, Nov. 2012.

FALLAH VAZIRABAD, Y.; KARSLIOGLU, M.O. **Lidar for Biomass Estimation.** En: Matovic, D. (ed.): *Biomass Detection, Production and Usage.* 1-26. 2011.

FAO 2013. **State of mediterranean forests.** 2013 – Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/017/i3226e/i3226e.pdf> - acesso em: Junho de 2015.

FAO. 2010. **El Estado de los bosques del mundo. Bosques, actividad forestal y productos forestales para un futuro sostenible.** Roma. 3: p. 26 – 46. 2010.

FERREIRA, J.S. Teoria e método em climatologia. **Revista GEONORTE.** Edição Especial 2. Manaus. v. 1. n. 5. p.766 - 773. 2012.

FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASCHI, A. **Relação entre índice de vegetação global e condições hídricas no Rio Grande do Sul: Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v.33, n.8, p. 1399-1405, 1988.

FOODY, G. M.; BOYD, D. S.; CUTLER, M. J. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions. **Remote Sensing of Environment.** v. 85. p. 463–474. 2003.

FREY, W. **The influence of snow on growth and survival of planted trees.** *Arctic, Antarctic and Alpine Research* 15: 241-251. 1983.

FUNDACIÒ CATALUNYA – **La Pedrera.** Disponível em: <http://www.fundaciocatalunya-lapedrera.com/ca/content/espai-natura-muntanya-d%E2%80%99aliny%C3%A0>. Acesso em: Julho de 2015.

GARCÍA, M.; *et al.* Estimating biomass carbon stocks for a Mediterranean forest in central Spain using LiDAR height and intensity data. **Remote Sensing of Environment,** 114 (4), p. 816.2010.

GIFFORD, R. **Carbon Content of Woody Roots: Revised Analysis and a Comparison with Woody Shoot Components (Revision 1).** NCAS Technical Report No. 7. 10p. Australian Greenhouse Office, Canberra. 2000.

GIONGO, M.; BASTOS, P. S.; PINTO JÚNIOR, J. P. **LIDAR: princípios e aplicações florestais.** *Pesquisa florestal Brasileira,* v. 30, p. 231-244, 2010.

HANSEN, J. *et al.* **Global Temperatura.** *Change. Proceedings of the National Academy of Sciences,* v. 103. p. 14288-14293, 2006.

HOLMGREN; THURESSONT. Satellite remote sensing for forestry planning. **Scandinavian Journal of Forest Research.**13(1), p. 90-110. 1998.

HOPKINSON, C; CHASMER, L. Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. **Remote Sensing of Environment**, Volume 113. Pages 275-288. 2009.

HUETE A. R. **A soil-adjusted vegetation index (SAVI)**. *Remote Sensing of Environment*, 25: 295-309. 1988.

HYDE, P. **Exploring LiDAR–RaDAR synergy—predicting aboveground biomass in a southwestern ponderosa pine forest using LiDAR, SAR and InSAR**, *Remote Sensing of Environment*, Volume 106. Pages 28-38. 2007 **Instituto de Meteorologia (I. M.)**. 2009. Disponível em: <http://www.meteo.pt/pt/enciclopedia/agrometeorologia>. Acesso em: Maio de 2015.

IPCC. **Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2007.

IPCC. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. PENMAN J., *et al.* (Eds). **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)**, IPCC/IGES, hayama, Japan. 2013.

IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2015. Acesso em: <http://www.ipcc.ch/em/15/08/2015>. 2015.

IPCC. The Physical Science Basis. 2011. **www.ipcc.ch** - Acesso Marco de 2015.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva Em Recursos Terrestres**. Tradução José Carlos Neves Epiphanyo (Coord.)...[Et Al]. São José Dos Campos: Parêntese. 2009.

JESUS, E. F. R. DE. **Algumas reflexões teórico-conceituais na climatologia geográfica em mesoescala: uma proposta de investigação**. *GeoTextos*, vol. 4, n. 1 e 2. p.165-187. 2008.

KIM, Y; *et al.* **Distinguishing between live and dead standing tree biomass on the north rim of Grand Canyon National Park, USA using small-footprint lidar data** *Remote Sens. Environ.*, 113. p. 2499–2510. 2009.

LABRECQUE, S.; *et al.* **A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in wester**. Newfoundland. *Forest Ecology and Management*. v. 226. p. 129–144. 2006.

LEFSKY M.A., *et al.* LiDAR remote sensing for ecosystem studies . **BioScience**, 52 (1) , p. 19-30. 2002.

LEWIS, S.L.; *et al.* **Increasing carbon storage in intact African tropical forests**. *Nature*. . 457(7232):1003-6. doi: 10.1038/nature07771. 2009.

LINDNER, M.; *et al.* **Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems**. *Forest Ecology and Management* 259: p. 698-709. 2010.

LIRA, D. R.; ARAUJO, M.S.B.; SA, E. V.; Da SILVA, H. A. Mapeamento e Quantificação da Cobertura Vegetal do Agreste Central de Pernambuco Utilizando o NDVI. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 03, p. 157-162, São Paulo. 2010.

LU, D.; *et al.* **Aboveground estimativas de biomassa de floresta com Landsat e dados LiDAR e análise de incerteza das estimativas**. Int. J. Para. Res. p. 1-16. 2012.

LUND, H. G.; THOMAS, C. E. **A primer on stand and forest inventory designs**. General Technical Report WO-5.1. Washington. DC: U.S. Department of Agriculture: Forest Service. 96 p. 1989.

MAGRAMA - **Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente**. Disponível em: <http://www.magrama.gob.es/es/> - Acesso em: Julho de 2015.

MAIN-KNORN, M. *et al.* **Evaluating the Remote Sensing and Inventory-based estimation of biomass**. Remote Sensing, 3: p. 1427–1446. 2011.

MALLET, C. BRETAR, F. Full-waveform topographic lidar: state-of-the-art. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 64, p. 1–16. 2009.

MARKHAM, B. L. & BARKER, J. L. **Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at satellite temperatures**. EOSAT Landsat Tech. Note: 3-8. 1986.

MARM - **Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino**. 2009. Anuario de estadística 2009. Secretaría general técnica. Disponível em: <http://www.mapa.es/es/estadistica/pags/anuario/introduccion.htm#art2> – Acesso em: Agosto de 2015.

MALLET, C; BRETAR, F. Full-waveform topographic LiDAR: state-of-the-art. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 64, p. 1 –16. 2009.

MATOS, J. L. **Fundamentos de Informação Geográfica**. Lidel 4^a ed. Coimbra, Portugal, 2001.

MEDINA, A. S. *et al.* **Silvicultural Alternatives to Spain's Fagus sylvatica Yield Tables from Another European Yield Tables**. Statistics and Modelling Theme. In: Sustainable Forestry in Theory and Practice. USDA. ISBN 978-9789478-0-4. 2005.

METZGER, J. P. **Como restaurar a conectividade de paisagens fragmentadas?**. Restauração ecológica de ecossistemas naturais. FEPAF. Botucatu. cap.3, p. 51- 76. 2003.

MIRANDA, P. M. A.; *et al.* **“O clima de Portugal nos séculos XX e XXI”, em Alterações climáticas, em, Portugal: Cenários, impactos e medidas de adaptação - Projecto SIAM II** (ed. por F. D. Santos e P. Miranda), p. 47–113. Lisboa, 2006.

MOGNON, F. **Dinâmica do estoque de carbono como serviço ambiental prestado por um fragmento de floresta Ombrófila Mista Montana localizada no sul do estado do Paraná**. 104f. Dissertação. (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2011.

MOISÉS, J. *et al.* **Estudi climatològic de la Vall d'Alinyà. En: Els sistemes naturals de la vall d'Alinyà.** Barcelona: Institució Catalana d'Història Natural, p. 17-45. 2004.

MONTEIRO, C. A. F. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico.** Florianópolis: UFSC, 1991.

MONTERO G., RUIZ-PEINADO, R., MUÑOZ, M. **Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles.** Monografías INIA, Serie Forestal; 13. Madrid. 2005.

MONTERO, G. *et al.* **Red de parcelas experimentales permanentes del CIFOR-INIA.** Cuadernos SECF, 18, p. 229–236. 2004.

MONTSERRAT, J. M. **Evolución glaciaria y postglaciaria del clima y la vegetación en la vertiente surdel Pirineo: Estudio Palinológico.** Zaragoza: Instituto Pirenaico de Ecología y C.S.I.C. 1992.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação.** 3. ed. Viçosa: UFV, p. 32. 2005.

MORONI, M. **El papel de la gestión de los bosques en la mitigación de gases de efecto invernadero: un marco contextual de Australia.** 978-1-921763-21-2. Forest y Productos de Madera Australia, Melbourne. 2011 – Disponible em: www.fwpa.com.au. – Acceso em: Agosto de 2015.

MOSSELER, A. *et al.* **Allometric relationships in coppice biomass production for two North American willows (*Salix* spp.) across three different sites.** Forest Ecology and Management. Volume 320. 2014.

MUUKKONEN, P.; HEISKANEN, J. Biomass estimation over a large area based on standwise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. **Remote sensing of Environment.** v.107. p. 617-624. 2007.

NAESSET, E.; GOBAKKEN, T. Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. **Remote Sensing of Environment,** Basel, v. 112, n. 6, p. 3079-3090. 2008.

NASA, **National Aeronautics and Space Administration.** Disponible em: www.nasa.gov - Acceso em: Agosto de 2015.

NEEFF, T.; *et al.* Carbon budget estimation in Central Amazônia: Successional Forest modeling from remote sensing data. **Remote Sensing of Environment.** v. 94. p. 508-522. 2005.

NETHERER S.; SCHOPF A. **Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests - General aspects and the pine processionary moth as specific example.** Forest Ecology and Management. 259. p. 831 - 838. 2010.

NICOLAS PICARD; *et al.* **Should tree biomass allometry be restricted to power models?** Forest Ecology and Management. v. 353. p. 156-163. 2015.

NOAA – Disponível em: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>. Acesso em: Agosto de 2015.

NOVO, E. M. L. de M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher. 308 p. 1995.

NW KU; *et al.* **Avaliação de pastagens disponíveis biomassa lenhosa com um sistema LiDAR terrestre**. Photogramm. Eng. Remoto Sens. 78. p. 349-361. 2012.

OSE – Observatorio de Sostenibilidad de España. **Biodiversidad en España**. Base de la Sostenibilidad ante el cambio global. 5. 2011.

OLSOY, P.J.; GLENN, N.F.; CLARK, P.E. **Estimating sagebrush biomass using terrestrial laser scanning (TLS)**. Rangeland Ecol. Manage. 67. p. 224–228. 2014.

PÁSCOA, F.; *et al.* **Estabelecimento simultâneo de equações de biomassa para o pinheiro-bravo**. Simpósio Iberoamericano de Gestión y Economía Forestal, 2, 2004, Barcelona. Barcelona. 2004.

RENGIFO, M. Y M. PUENTES. **Penetración de la señal del sistema ALS40 LiDAR aerotransportado en la cobertura vegetal presente en las islas: La Viciosa y El Morro**. Boletín Científica CCCP. p. 95-108. 2007.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y, E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos-SP. Ed: Parêntese, 2009.

POPESCU, S.C.; *et al.* **Satellite LiDAR vs. small footprint airborne lidar: Comparing the accuracy of aboveground biomass estimates and forest structure metrics at footprint level**. **Remote Sensing of Environment**. 115 (11), 2786. 2011.

PRADO, T. B. G. **Evolução do uso das terras e produção de sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Jundiá-Mirim**. Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação, em Agricultura Tropical e Subtropical do Instituto Agrônomo. Campinas. 2005.

PROJETO LIFE - 2014/203/EU: Commission Implementing Decision of 19 March 2014 on the adoption of the LIFE multiannual work programme for 2014-17 Text with EEA relevance. Disponível em: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:JOL_2014_116_R_0001 – Acesso em: Agosto de 2015.

RAMIL-REGO, P.; *et al.* **Differences in the vegetation of the North Iberian Peninsula during the last 16,000 years**. *Plant Ecology* 138. p. 41-62. 1998.

RATUCHNE, L. C. **Ajuste e Seleção de Equações Alométricas para a Estimativa de Biomassa, Carbono e Nutrientes em uma Floresta Ombrófila Mista**. 102f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Setor de Ciências Agrárias, UNICENTRO/PR, Guarapuava. 2010.

REUTEBUCH, S.E.; ANDERSEN, H., MCGAUGHEY, R.J. **Light detection and ranging (LiDAR): an emerging tool for multiple resource inventory**. *J. Forest.* 103. p. 286–292. 2005.

REUTEBUCH, S.E.; *et al.* Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. **Canadian Journal of Remote Sensing**. 29(5). p. 527-535. 2003.

REZENDE, D.; MERLIN, S.; SANTOS, M. T. **Sequestro de carbono: uma experiência concreta**. Ed. Gráfica Terra. Palmas: Instituto Ecológica. 2ªEd. 178p. 2001.

RIBEIRO, S. C.; *et al.* Quantificação de biomassa e estimativa de estoque de carbono em uma capoeira da zona da mata mineira. **Revista Árvore**, v.34, n.3. p. 495-504. 2010.

REUTEBUCH, S.E., ANDERSEN, H., MCGAUGHEY, R.J. **Light detection and ranging (LiDAR): an emerging tool for multiple resource inventory**. J. Forest. 103. p. 286 –292. 2005.

ROSENQVIST, A. *et al.* A review of remote sensing technology in support of the Kyoto protocol. **Environmental Science and Policy**, v.6, p. 441–455. 2003.

ROUSE, J. W.; *et al.* **Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. Proceedings. Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, v. 1.1973.**

SALAS, C.; *et al.* Modelling tree diameter from airborne laser scanning derived variables: a comparison of spatial statistical models. **Remote Sensing of Environment** 114 (6): p. 1277-1285. 2010.

SANCHEZ PEÑA G.; MARTINEZ-SAAVEDRA J. **Proceso de contabilización de los sumideros de CO2 en los sistemas forestales españoles**. Cuadernos de la SECF, nº 12, 29-34. 2001.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. **Metodologias para a determinação de biomassa florestal**. In: Sanquetta, C. R.; Balbinot, R.; Ziliotto, M. A. B. Fixação de carbono: atualidades, projetos e pesquisas. Curitiba. p. 77-93. 2004.

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

SANTOS, M. **Por uma Geografia nova: da crítica da geografia a uma geografia crítica**. São Paulo, HUCITEC, 2002.

SCHAFFER, A. G.; LOCH, R. E. N. **Aplicação dos dados do sensor Laserscanner para modelagem do terreno visando projetos rodoviários**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, INPE, p. 749-756. 2005.

SHAW, C.H.; *et al.* Evaluation of simulated estimates of forest ecosystem carbon stocks using ground plot data from Canada's National Forest Inventory. **Ecological Modelling**. v. 272. p. 323-347. 2014.

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

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e Inventário Florestal**. Editora UFV: Viçosa, MG. 276p. 2006.

SORRE, M. Le Climat. In: SORRE, M. **Les Fondements de la Géographie Humaine**. Paris: Armand Colin. Chap. 5, p.13-43. 1951.

SWATANTRAN, A.; *et al.* **Mapping Biomass and Stress in the Sierra Nevada using Lidar and Hyperspectral Data Fusion**. *Remote Sensing of Environment*, 115-11, p. 2917-2930. 2011.

TARDIF, J., *et al.* **Spatio-temporal variability in tree ring growth in the Central Pyrenees: climatic and site influences**. *Ecological Monographs* 73: p. 241-257. 2003.

TELLER, A. **Biomass, productivity and wood waste evaluation in a Spruce (*Picea abies*) forest (Strinchmps 983)**. *Commonwealth Forestry Review*, 7(2): p. 129-148. 1988.

TEMESGEN, H.; *et al.* **Sessions A review of the challenges and opportunities in estimating above ground forest biomass using treelevel models**. *Scand. J. For. Res.*, 30 (4) p. 326–335. 2015.

NETO, T. P. **Ecopolítica das mudanças climáticas: o IPCC e o ecologismo dos pobres**. Rio de Janeiro: Centro Edelstein de Pesquisas Sociais. As mudanças climáticas na ordem ambiental internacional. p. 37-81. 2010.

TSUI, O.W.; *et al.* Integrating airborne LiDAR and space-borne radar via multivariate kriging to estimate above-ground biomass. **Remote Sensing of Environment**. 139, p. 340–352. 2013.

Universidad Autonoma de Madrid – Disponível em: http://www.uam.es/personal_pdi/stmaria/pgpuelle/HELP/FotosArboles/A460B06C01_Pinus_uncinata.jpg - Acesso em: Agosto de 2015.

VAN DER WARF, G.R.; *et al.* **CO2 emissions from forest loss**. *Nat. Geosci.*, 2 (11), p. 737–738. 2009.

VIERLING, K.T.; *et al.* **Spinning a laser web: predicting spider distributions using LiDAR**. *Ecol. Appl.* 21, p. 577–588. 2011.

WANG LI; *et al.* **Airborne LiDAR technique for estimating biomass components of maize: A case study in Zhangye City**. Northwest China, *Ecological Indicators*, Volume 57. p. 486-496. 2015.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANGUETTA, C.R. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite IKONOS II**. *Ciência Florestal*, v. 19, n. 2, p. 169-181, 2009.

WITHERS, M.; MALINA, R.; BARRETT, S. **Carbon, climate, and economic breakeven times for biofuel from woody biomass from managed forests**. *Ecological Economics*, v. 112, p. 45-52. 2015.

YAO T.; *et al.* Measuring forest structure and biomass in New England forest stands using Echidna ground-based LiDAR. **Remote Sensing of Environment**, v. 115. p. 2965-2974. 2011.

YOUNG, J.; *et al.* **Climate Change and Biodiversity Conservation: Knowledge needed to support development of integrated adaptation strategies.** Report of an e-conference. Londres, Inglaterra. 2005.

ZHAO, K.; POPESCU, S.; NELSON, R. Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. **Remote Sensing of Environment.** Volume 113, Issue 1. p. 182-196. 2009.

ZHAO, K.; POPESCU, S.C.; NELSON, R.F. Lidar remote sensing of forest biomass: A scale-invariant estimation approach using airborne lasers. **Remote Sensing of Environment.** 113, p. 182–196. 2009.

ZHAO, M.; RUNNING, S. W. **Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009.** Science. v. 329. p. 940-943. 2010.

ZOLKOS, S.G.; GOETZ, S.J.; DUBAYAH, R. A meta-analysis of terrestrial aboveground biomass estimation using lidar remote sensing. **Remote Sensing of Environment,** v. 128. p. 289-298. 2013.

7.1 Softwares utilizados.

3D GeoData Viewer FugroViewer. Visor de datos LiDAR. Copyright © Fugro
<<<http://www.fugroviewer.com/>>>

ArcGIS® software by Esri. ArcGIS® and ArcMap™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. <<www.esri.com>>

ERDAS Imagine. Leica Geosystems: << <http://www.hexagongeospatial.com> >>

GoogleEarth. Google << <https://www.google.com/earth/> >>

McGaughey R J 2008 FUSION/LDV: Software for LiDAR Data Analysis and Visualization (Portland, OR: USDA, Forest Service, Pacific Northwest Research Station).
<<<http://forsys.cfr.washington.edu/>>>

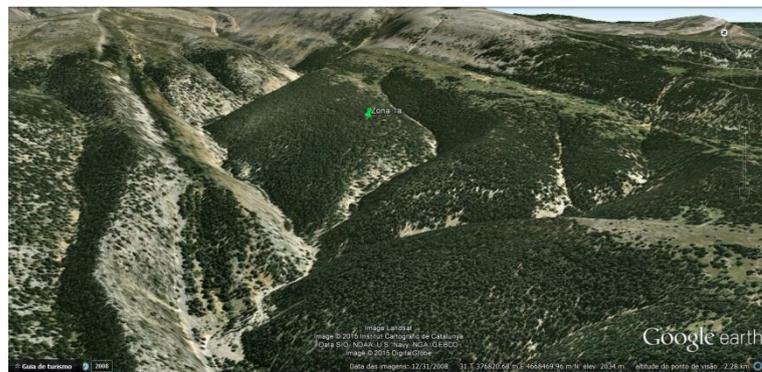
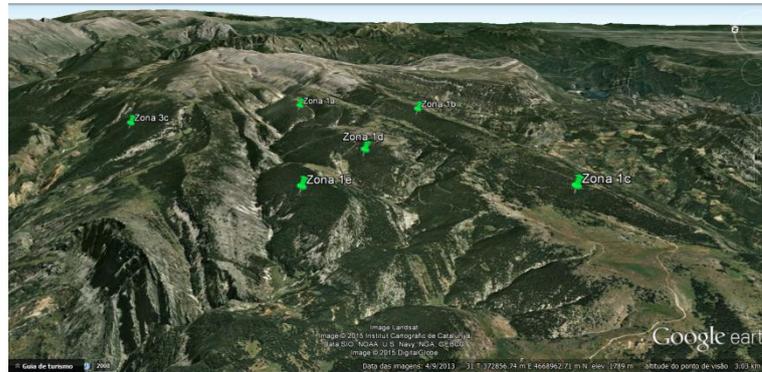
Martin Isenburg, LAsTools - efficient tools for LiDAR processing.
version 111216, <<<http://lastools.org>>>

Quantum GIS Development Team, <2013>. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <<<http://qgis.osgeo.org>>>

R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>. [Consulta: marzo 2014].

ANEXOS

ANEXO 1- Imagens tridimensionais da área de estudo obtidas pelo Google Earth.



ANEXO 3 – Série de estatísticos extraídos dos dados LiDAR pelo FUSION

Available metrics are:	
count	Number of returns above the minimum height
densitytotal	total returns used for calculating cover
densityabove	returns above heightbreak
densitycell	Density of returns used for calculating cover
min	minimum value for cell
max	maximum value for cell
mean	mean value for cell
mode	modal value for cell
stddev	standard deviation of cell values
variance	variance of cell values
cv	coefficient of variation for cell
cover	cover estimate for cell
abovemean	proportion of first (or all) returns above the mean
abovemode	proportion of first (or all) returns above the mode
skewness	skewness computed for cell
kurtosis	kurtosis computed for cell
AAD	average absolute deviation from mean for the cell
p01	1st percentile value for cell (must be p01, not p1)
p05	5th percentile value for cell (must be p05, not p5)
p10	10th percentile value for cell
p20	20th percentile value for cell
p25	25th percentile value for cell
p30	30th percentile value for cell
p40	40th percentile value for cell
p50	50th percentile value (median) for cell
p60	60th percentile value for cell
p70	70th percentile value for cell
p75	75th percentile value for cell
p80	80th percentile value for cell
p90	90th percentile value for cell
p95	95th percentile value for cell
p99	99th percentile value for cell
iq	75th percentile minus 25th percentile for cell
90m10	90th percentile minus 10th percentile for cell
95m05	95th percentile minus 5th percentile for cell
r1count	Count of return 1 points above the minimum height
r2count	Count of return 2 points above the minimum height
r3count	Count of return 3 points above the minimum height
r4count	Count of return 4 points above the minimum height
r5count	Count of return 5 points above the minimum height
r6count	Count of return 6 points above the minimum height
r7count	Count of return 7 points above the minimum height
r8count	Count of return 8 points above the minimum height
r9count	Count of return 9 points above the minimum height
rothercount	Count of other returns above the minimum height
allcover	(all returns above cover ht) / (total returns)
afcover	(all returns above cover ht) / (total first returns)
allcount	number of returns above cover ht
allabovemean	(all returns above mean ht) / (total returns)
allabovemode	(all returns above ht mode) / (total returns)
afabovemean	(all returns above mean ht) / (total first returns)
afabovemode	(all returns above ht mode) / (total first returns)
fcountmean	number of first returns above mean ht
fcountmode	number of first returns above ht mode
allcountmean	number of returns above mean ht
allcountmode	number of returns above ht mode
totalfirst	total number of 1st returns
totalall	total number of returns