



**USO DE IMAGEM AÉREA NA ESTIMATIVA DE VOLUME E  
BIOMASSA EM POVOAMENTO DE *EUCALYPTUS* SP.**

**THALLITA RAQUEL DA SILVA MENDES**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL

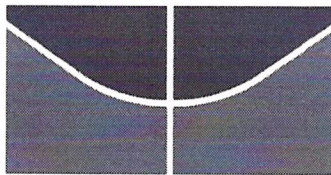
**USO DE IMAGEM AÉREA NA ESTIMATIVA DE VOLUME E  
BIOMASSA EM POVOAMENTO DE *EUCALYPTUS SP.***

Thallita Raquel da Silva Mendes

Trabalho final de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como Requisito Parcial para a obtenção do grau de Engenheiro Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Eder Pereira Miguel

Brasília – DF  
Junho de 2018



Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Florestal

**USO DE IMAGEM AÉREA EM ESTIMATIVA DE VOLUME E BIOMASSA  
EM POVOAMENTO DE *EUCALYPTUS SP.***

Estudante: THALLITA RAQUEL DA SILVA MENDES

Matrícula: 10/0131361

Orientador: Prof. Dr. EDER PEREIRA MIGUEL

Menção: SS

---

Prof. Dr. Eder Pereira Miguel  
Universidade de Brasília – UnB  
Departamento de Engenharia Florestal  
Orientador

---

Prof. Dr. Alba Valéria Rezende  
Universidade de Brasília - UnB  
Membro da Banca

---

Prof. Dr. Eraldo A. T. Matricardi  
Universidade de Brasília – UnB  
Membro da Banca

Junho/2018

“Se você pensa que pode ou se pensa que não pode, de qualquer forma você está certo.”

Henry Ford

## Agradeço

Aos meus pais por me acompanharem e orientarem durante toda minha vida. Aos estímulos e à esperança oferecidos diariamente. À minha mãe, Eliane, a personificação do amor em minha vida, oferecendo sempre seu carinho e cuidado sem medida. Ao meu pai, Wagner, por me auxiliar a expandir minha visão de mundo e a não acreditar no impossível.

Às minhas irmãs, Thaís e Thábata, por serem as companheiras que a vida me ofereceu para me auxiliar nessa jornada. Por me oferecerem sua presença quando necessitei, por acreditarem em mim, por serem capazes de enxergar os meus dois lados: *Yin e Yang*.

À minha amiga Narla por ter sido tão presente e fazer parte da minha vida.

A toda minha família e amigos.

À Universidade de Brasília e ao Departamento de Engenharia Florestal por me oferecerem subsídios para me desenvolver academicamente, bem a todos os professores que contribuíram com meu processo de formação ao longo dos anos.

À professora Denise Vilela por sua prontidão em ajudar, por seu espírito de criança contagiando todos aos redores e por ter ensinado que o trabalho pode ser apaixonante.

À professora Alba Rezende por ter feito certo no momento certo, desempenhando também seu papel de educadora. Mais tarde pude perceber o quanto um “não” tem o poder de abrir muitas outras portas. Sua postura e correção me orientaram na escolha deste tema.

Ao professor Eder Miguel por sua paciência e bom humor ao me orientar, sempre me presenteando com palavras de força e perseverança. Você é um *outlier*.

Ao professor Eraldo Matricardi por ser um grande pai na graduação. Sempre disposto a se doar. Obrigada pela amizade.

Ao colega Marco Bruno por ter contribuído com os dados para a realização deste trabalho.

Aos colegas da faculdade que me aceitaram, entendendo, como eu, que devemos ter princípios e ética, de modo a sobrepujar os maus hábitos e incoerências enraizados em nosso sistema educacional. Que sejamos a diferença que nossa sociedade precisa.

À sociedade brasileira, reconhecendo que a possibilidade de estudar numa Universidade Pública advém de sua contribuição. Que minha formação me permita oferecer algum retorno a ela.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| RESUMO .....  | 9  |
| ABSTRACT .....  | 10 |
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 11 |
| 2. OBJETIVOS.....   | 12 |
| 2.1. OBJETIVO GERAL.....  | 12 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 12 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 13 |
| 3.1. <i>Eucalyptus sp.</i> .....  | 13 |
| 3.2. Biomassa .....   | 13 |
| 3.3. Volume Florestal .....   | 14 |
| 3.4. Sensoriamento Remoto.....  | 15 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS.....  | 16 |
| 4.1. Caracterização da área de estudo.....  | 16 |
| 4.2. Metodologia.....   | 17 |
| 4.3. Informações do sensor e da imagem aérea .....  | 18 |
| 4.4. Inventário Florestal.....  | 18 |
| 4.5. Cubagem Rigorosa .....   | 19 |
| 4.6. Quantificação de Biomassa .....  | 20 |
| 4.7. Estimativa de volume e biomassa.....   | 21 |
| 4.8. Determinação de Índices de Vegetação.....  | 22 |
| 4.8.1. Índice de Vegetação Ajustado para o Solo Modificado (MSAVI).....   | 22 |
| 4.8.2. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI).....   | 22 |
| 4.9. Escolha dos melhores modelos.....  | 23 |
| 4.10. Comparação entre os resultados do inventário florestal e dos índices de vegetação.....  | 23 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 24 |
| 5.1. Ajuste e seleção de modelos matemáticos para estimativa de volume e biomassa de árvores individuais. ....  | 24 |
| 5.2. Inventário Florestal tradicional.....  | 28 |
| 5.3. Correlação entre variáveis do povoamento e índices de vegetação.....   | 29 |
| 5.4. Ajuste de modelos para estimativa de volume e biomassa a nível de povoamento utilizando índices de vegetação e área basal .....  | 31 |
| 5.5. Comparação entre estimativas de volume e biomassa obtidas por inventário florestal tradicional com os resultados das estimativas oriundas da combinação de dados derivados de sensoriamento remoto com área basal..... | 35 |
| 6. CONCLUSÕES.....  | 37 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 38 |

8. ANEXOS..... 49

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Povoamento de <i>Eucalyptus</i> sp. localizado na Fazenda Água Limpa (FAL) - DF. ....  | 17 |
| Figura 2. Procedimento adotado para cubagem rigorosa por Smalian. (FINGER, 1992) .....   | 20 |
| Figura 3. Gráficos de dispersão de valor estimado por valor observado, dispersão de resíduos e distribuição em classes de erro obtidos para os ajustes de equações para estimativa de volume. Em que (a), (b) e (c) são referentes ao modelo de Schumacher-Hall; (d), (e) e (f) ao modelo de Meyer; (g), (h) e (i) ao modelo de Spurr.....   | 26 |
| Figura 4. Gráficos de dispersão de valor estimado por valor observado, dispersão de resíduos e distribuição em classes de erro obtidos para os ajustes de equações para estimativa de biomassa. Em que (a), (b) e (c) são referentes ao modelo de Schumacher-Hall; (d), (e) e (f) ao modelo de Meyer; (g), (h) e (i) ao modelo de Spurr. ....  | 27 |
| Figura 5. Gráficos de dispersão de valor estimado por valor observado, dispersão de resíduos e distribuição em classes de erro obtidos para os ajustes de equações para estimativa de volume em m <sup>3</sup> por hectare (m <sup>3</sup> /ha) utilizando índices de vegetação e área basal. Em que (a), (b) e (c) são referentes ao modelo de Ratkowsky; (d), (e) e (f) ao modelo de Gompertz; (g), (h) e (i) ao modelo Logístico..... | 32 |
| Figura 6. Gráficos de dispersão de valor estimado por valor observado, dispersão de resíduos e distribuição em classes de erro obtidos para os ajustes de equações para estimativa de biomassa em kg por hectare (kg/ha) utilizando índices de vegetação. Em que (a), (b) e (c) são referentes ao modelo de Ratkowsky; (d), (e) e (f) ao modelo de Gompertz; (g), (h) e (i) ao modelo Logístico. ....                                    | 34 |
| Figura 7. Cena obtida a partir de cálculo do índice de vegetação NDVI. ....  | 49 |
| Figura 8. Cena obtida a partir de cálculo do índice de vegetação MSAVI. ....   | 49 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Estimativas utilizadas para processamento de inventário florestal.....  | 19 |
| Tabela 2. Modelos matemáticos ajustados para estimativa de volume e biomassa utilizando parâmetros biofísicos. ....   | 21 |
| Tabela 3. Modelos ajustados para estimativa de volume e biomassa a partir de variáveis do sensoriamento remoto.....   | 24 |
| Tabela 4. Resultados estatísticos do ajuste de modelos para estimativa de volume em m <sup>3</sup> por indivíduo utilizando variável DAP e altura. ....   | 25 |
| Tabela 5. Resultados estatísticos do ajuste de modelos para estimativa de biomassa em kg por indivíduo utilizando variável DAP e altura. ....   | 26 |
| Tabela 6. Resultados obtidos pelo Teste T de médias pareadas aplicado para validação do ajuste dos modelos que estimaram volume e biomassa a nível de indivíduo. Realizado com valores das 06 árvores não utilizadas no ajuste..... | 28 |
| Tabela 7. Estimativas dos parâmetros do povoamento obtidas pelo inventario florestal utilizando equação de Schumacher-Hall ajustada para estimativa de volume e de biomassa.....  | 29 |
| Tabela 8. Coeficientes de correlação entre a área basal, volume e biomassa e índices de vegetação...  | 30 |
| Tabela 9. Resultados estatísticos do ajuste dos modelos para estimar volume (m <sup>3</sup> /ha) a partir de índices de vegetação (MSAVI e NDVI).....   | 31 |
| Tabela 10. Resultados estatísticos do ajuste dos modelos visando estimar biomassa (kg/ha) a partir dos índices de vegetação (MSAVI e NDVI).....   | 33 |
| Tabela 11. Resultados obtidos pelo Teste T de médias pareadas aplicado para validação de ajuste de modelos que estimaram volume e biomassa a nível de povoamento. Realizado com as 07 parcelas não utilizadas no ajuste.....        | 35 |
| Tabela 12. Quadro comparativo entre estatísticas obtidas por inventário tradicional e pela aplicação do modelo Gompertz ajustado.....   | 36 |

## RESUMO

A avaliação de povoamentos florestais é crucial para gerenciamento e planejamento da utilização desses recursos. Inventários florestais, o instrumento que permite o conhecimento da situação do plantio, podem ser onerosos e demandar bastante tempo. Visando facilitar e diminuir o tempo gasto com a obtenção desses dados, o principal objetivo deste trabalho foi avaliar a precisão das estimativas de volume e biomassa por unidade de área com dados oriundos do sensoriamento remoto. Foram alocadas e georreferenciadas 40 unidades amostrais, nas quais todas as árvores com diâmetro a altura do peito (DAP)  $\geq 5$  cm foram inventariadas, sequencialmente as mesmas foram distribuídas em classes de diâmetro, para o conhecimento da estrutura horizontal do povoamento e subsídio para realização da cubagem rigorosa, obtenção do volume e biomassa individual e, por conseguinte, ajuste dos modelos de volume e biomassa individual. Com dados de imagens georreferenciadas da área de estudo foram obtidos os índices de vegetação MSAVI (Índice de Vegetação Ajustado para o Solo Modificado) e NDVI (índice de vegetação da diferença normalizada). A estimativa de volume e biomassa utilizando variáveis do sensoriamento remoto foi feita por meio do ajuste de modelos sigmoidais por análise de regressão, que utilizou como variável independente combinação dos valores médios dos índices de vegetação e a área basal das parcela/hectares. Os ajustes apresentaram resultados satisfatórios. Os modelos são consistentes, logo informações derivadas do sensoriamento remoto associado com variáveis de campo estimam com precisão superior a 90% o volume e a biomassa por unidade de área. Portanto, o resultado é uma alternativa viável para obtenção de dados do povoamento de forma mais ágil.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, índices de vegetação, povoamento florestal, produção.

## **ABSTRACT**

Assessing forest stands is crucial for managing and planning the use of these natural resources. Forest inventories, an instrument which give the information about the stands, can be costly and time consuming. Aiming to facilitate and reduce the time taken to obtain this data, this study aimed to assess the accuracy of volume and biomass estimated per area unit using data from remote sensing. 40 sample units were allocated and georeferenced, in which all trees whose diameter at breast height (DBH)  $\geq 5$  cm were measured, and distributed by their diameter classes, in order to know the stand horizontal structure and to subsidy the Smalian method, volume and biomass estimation and, therefore, individual volume and biomass models adjustment. Using georeferenced image data from the study area, the vegetation indexes MSAVI (Adjusted Vegetation Index for Modified Soil) and NDVI (vegetation index of the normalized difference) were obtained. The volume and biomass estimation using remote sensing variables was done through the adjustment of sigmoidal models by regression analysis, which used the mean values of the vegetation indices and the plot basal area per hectares as independent variable. The results were satisfactory. The models are consistent, so information derived from remote sensing associated with field variables accurately, greater than 90%, estimates the volume and biomass per area unit. Therefore, the result is a viable alternative for obtaining stands data in a more agile way.

**Key-words:** remote sensing, vegetation indices, forest stands, production.

## 1. INTRODUÇÃO

Embora a economia brasileira tenha passado por um período difícil, marcada pela recessão do Produto Interno Bruto (PIB) por dois anos consecutivos (2015 – 2016), o setor florestal brasileiro, responsável por 6,2% do PIB Industrial no país, continua seu crescimento de forma expressiva: em 2016 os plantios florestais representavam uma área de 7,8 hectares plantados e mostravam um crescimento de 0,5% em relação ao ano anterior (IBÁ, 2017).

Características próprias do país, como clima e extensão territorial, impulsionam o setor e proporcionam vantagem na produção de madeira, favorecendo o desenvolvimento de um setor manufatureiro competitivo e gerando muitos recursos para o país. (SILVA; DIAS, 2016). A economia nacional é positivamente afetada ao passo que o setor gera empregos e renda, bem como favorece a sustentabilidade e a manutenção de florestas nativas, por meio da redução de pressão sobre essas. (JUVENAL; MATTOS, 2002. SILVA; DIAS, 2016).

No setor florestal, o gênero *Eucalyptus* é um dos mais importantes e estudado no mundo (PÉREZ-CRUZADO et al, 2011), sendo utilizado principalmente para indústria madeireira e celulósica (MORA; ARRIAGADA, 2016). No Brasil o gênero ocupa um total de 75,3% de toda a área plantada (IBGE, 2016). O seu amplo emprego na produção madeireira se justifica por seu rápido crescimento, sua grande capacidade produtiva e por sua adaptabilidade aos mais distintos ambientes, bem como sua grande diversidade de espécies que conseguem atender a demandas de diferentes segmentos da produção industrial madeireira (LOBÃO et al., 2004). Todas essas características tornam a biomassa de eucalipto a mais utilizada quando o objetivo principal é a produção de energia (FERREIRA et al., 2017).

Tradicionalmente a quantificação de biomassa e de volume de madeira é realizada por meio de inventários florestais, que requerem levantamento de dados em campo. De uma forma geral, a realização de um inventário florestal é um processo bastante laborioso, tempo-dispendioso e, às vezes, inaplicável devido à inacessibilidade a algumas áreas remotas (TIMOTHY et al., 2016).

Conhecer os parâmetros biofísicos de florestas – como volume e biomassa – é propósito de inventários florestais, haja vista que conhecê-los permite a obtenção de informações críticas a respeito da distribuição espacial e temporal das florestas (MIURA et al. 2010). O manejo florestal contemporâneo em povoamentos florestais ou florestas nativas, requer a obtenção dessas informações de forma contínua, espacialmente contíguas e multitemporais, com cenários comparáveis, fornecendo subsídio para a execução acertada da exploração das árvores de forma sustentável e continua em longo prazo. (PASHER; KING, 2010. HUANG et al., 2018).

O sensoriamento remoto, a partir de técnicas que utilizam imagens de satélite, permite observar a área de interesse como um todo, de forma consistente, repetitiva e sistemática do crescimento da floresta, possibilitando caracterizar as diferenças de crescimento e produtividade da área. (PONZINI et al. 2015; HUANG et al. 2018). Neste cenário, sua utilização oferece novas possibilidades: amplia o alcance às áreas, auxilia e aprimora as estimativas obtidas em campo (LEYK et al., 2002; OLIVEIRA et al., 2014) e ainda torna o processo de obtenção de dados mais fácil e menos oneroso (MIGUEL et al., 2017).

A utilização de imagens de satélite para a área de silvicultura e agricultura requer resoluções espaciais e temporais suficientes para habilitar o monitoramento dentro do campo (KROSS et al., 2014). Para que o gerenciamento e a quantificação dos recursos florestais sejam viabilizados, promovendo estratégias para utilização e tomadas de decisão, a partir de técnicas de sensoriamento remoto, é necessário que os dados obtidos sejam capazes de prever parâmetros como volume de madeira e densidade de povoamento de forma acurada (GUNLU et al. 2012).

É importante promover o desenvolvimento de novas técnicas que visem integrar dados de campo com aqueles oriundos do sensoriamento remoto, a fim de melhorar a eficiência na estimativa de parâmetros biofísicos de povoamentos florestais, e ao mesmo tempo diminuir o tempo dos levantamentos. Assim, este estudo busca encontrar modelos que permitam a integração de dados oriundos de campo e de sensoriamento remoto e tenham estimativas consistentes de volume e biomassa de povoamento de *Eucalyptus sp.*

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1.OBJETIVO GERAL**

Avaliar a precisão da estimativa dos parâmetros biofísicos volume e biomassa de povoamento de *Eucalyptus sp.* a partir de ajuste de equações que utilizam variáveis derivadas do sensoriamento remoto, buscando reduzir o tempo de levantamento em campo e reduzir gastos financeiros.

### **2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Ajustar e selecionar modelos estatísticos de regressão para a estimativa do volume e biomassa para as árvores individuais;

Desenvolver modelos de estimativa de volume e de biomassa para o povoamento em função de índices de vegetação;

Validar os modelos de estimativa de volume e de biomassa que utilizam os parâmetros de sensoriamento remoto a partir de dados do inventário florestal.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1. *Eucalyptus sp.***

Edmundo Navarro de Andrade, escreveu dois livros (Manual do plantador de eucaliptos e O eucalipto), nos quais comenta que o gênero, originalmente da Oceania, teria ingressado na América Latina pelo Chile no século XIX. Em vista da necessidade e moirões, lenha, dormentes e postes para a Companhia Paulista de Estradas de Ferro e incentivado pelo sucesso do gênero em outros países, Navarro considerou seu potencial madeiro. (FOELKEL, 2006).

Inicialmente o monopólio da produção de papel e celulose pertencia aos países do Hemisfério Norte. No entanto, devido à baixa de seus recursos (haja vista que sua produção era baseada em florestas nativas) e a onda de movimentos ambientalista da década de 1960, o eixo da produção de madeira em larga escala para abastecimento de indústria foi deslocada para os países do Hemisfério Sul. (LIMA et al., 2017).

O uso de madeira de eucalipto se estende aos mais variados produtos. Tradicionalmente seu uso pode ser observado em lenha, estacas, moirões, dormentes, carvão vegetal, celulose e papel, chapas de fibras e de partículas. Além desses e com fim ainda mais nobre, destaca-se a aplicação em indústria moveleira, em estruturas e ainda em fabricação de casas (PEREIRA et al., 2000).

É notório o interesse em se conhecer cada vez mais as mais diversas espécies de *Eucalyptus sp.* e diversos são os estudos que objetivam analisar suas características. Face à preocupação crescente com uso sustentável de recursos naturais, é necessário fomentar cada vez mais o estudo e o conhecimento das propriedades tecnológicas do gênero quanto do aproveitamento de seus benefícios e da viabilização de sua aplicação em larga escala (JUIZO et al., 2017).

#### **3.2. Biomassa**

O termo biomassa se refere à toda massa de origem biológica, animal ou vegetal, viva ou morta. (SANQUETTA et al., 2014). As florestas absorvem o gás carbônico da atmosfera e o armazenam sob forma de biomassa florestal, a qual precisa ser estimada de forma confiável para quantificar o carbono fixado nos diversos ecossistemas. (ZIEMMER et al., 2016)

A produção de biomassa e o acúmulo de nutrientes em plantações de eucalipto se relacionam com a quantidade de radiação solar que o povoamento recebe e sua eficiência em converter essa energia em biomassa. (BARROS et al., 2008). Deste modo compreender como a biomassa é gerada é compreender a dinâmica de nutrientes em sítios florestais, e principalmente o processo de fotossíntese, pelo qual ocorre o acúmulo de biomassa. (CAMPOS; LEITE, 2017)

O acúmulo de biomassa varia de acordo com o ambiente em questão e isso se dá devido tanto à variação dos próprios fatores ambientais: atributos físicos e químicos do solo, disponibilidade hídrica e de nutrientes, espaçamento entre as plantas, temperatura e luz; quanto àqueles inerentes à própria planta, como sua genética. (RYAN et al., 2010)

Segundo Sanquetta et al. (2002) biomassa pode ser quantificada por dois métodos: direto, também conhecido como método destrutivo, por requerer a derrubada de árvores-amostra para obtenção dados; e indireto, também conhecido como método não-destrutivo, utilizando-se modelos de regressão linear ou não. Nesses, as variáveis independentes do modelo serão mensuráveis a campo, como diâmetro e altura, sem a necessidade de derrubar as árvores-amostra.

Watzlawick et al. (2011) salienta os estudos de quantificação de biomassa pelo método direto têm a desvantagem de ter alto custo e demandar tempo. Assim, quantificar a biomassa por método indireto, pela utilização de equações alométricas ou de técnicas sensoramento remoto, preferencial e mais vantajoso.

A importância da quantificação de biomassa florestal transcende a questão biológica e alcança o domínio econômico, pois é a partir da análise do potencial de produção de um local, ou seja, o conhecimento de sua produção biomassa, massa orgânica por unidade de área (Odum, 1986), que o planejamento e a tomada de decisões no setor florestal são subsidiados.

### **3.3. Volume Florestal**

A variável volume é um parâmetro biofísico de floresta e consiste na quantidade de espaço que ocupada por madeira, e é expresso em metros cúbicos e/ou metros estéreos. Conhecê-lo permite o entendimento de informações críticas da distribuição espacial e temporal das próprias florestas (MIURA et al. 2010).

Metódos de cubagem rigorosa são empregados no conhecimento do volume de tronco de árvore (NICOLETTI et al. 2012). Esses partem da divisão do tronco em seções menores e utilizam fórmulas geométricas para medição dessas, que somadas dão o volume total do tronco

(FAO, 1973). O método de Smalian, devido à sua facilidade, é o que mais tem sido aplicado em inventários florestais (SOARES et al., 2006).

Segundo Pellico Netto e Brenna (1997), conhecer os parâmetro biofísicos (volume e biomassa) da floresta é premissa para o manejo contínuo e racional dos recursos florestais, bem como para garantia do binômio produção e conservação. Também falam da importância dos recursos florestais para o desenvolvimento de países: “*Nenhum país pode prescindir dos recursos oriundos das florestas para seu desenvolvimento econômico e social.*” (PELLICO NETTO; BRENA, 1997, p.01).

### **3.4. Sensoriamento Remoto**

O termo Sensoriamento Remoto foi introduzido em 1960 pelo o U.S. *Office of Naval Research* no contexto de II Guerra Mundial (JENSEN, 2009), e é o estudo de objetos a grandes distâncias, que, a partir de modernos sensores, equipamentos de processamento de dados, teoria da informação e metodologia de processamento, permite a análise de pesquisa da superfície da Terra. (HOLTER, 1967)

O que se tem hoje com o desenvolvimento das técnicas de sensoriamento remoto é a possibilidade de monitorar e avaliação de grandes áreas, tornando possível compreender eventos ambientais como fragmentação, mudança na qualidade de solo e perda de biodiversidade, orientando os tomadores de decisão. (SANTOS et al. 2003)

Além disso, nos últimos anos com o avanço das técnicas de processamento digital de imagem aliado ao sensoriamento remoto, foi possível estimar a biomassa florestal a partir de valores de radiância/reflectância obtidos pelas imagens de satélite. (WATZLAWICK et al., 2009). Ou seja, de fato o uso de imagens de satélite se apresenta como alternativa menos onerosa e com menor grau de intervenção no ambiente para obtenção de informação.

As florestas plantadas apresentam vantagem ao relacionar as informações obtidas a partir do processamento de imagens de satélite com informações obtidas a campo quando comparadas com florestas nativas devido à sua homogeneidade e por serem regularmente inventariadas. (SILVEIRA et al., 2008).

A absorção, transmissão e reflexão de radiação pela vegetação permite inferir ocorrências de supressão, aumento e/ou redução de sua cobertura vegetal. Devido ao comportamento da vegetação, as principais faixas espectrais adotadas são a da região do vermelho (V) e infravermelho próximo (Nir) (ABREU; COUTINHO, 2014). Quanto mais densa a vegetação, maior é a absorção de energia na faixa do vermelho, gerando imagens



escuras. Já na região do infravermelho próximo, o comportamento é oposto, assim a vegetação tende a refletir mais esse tipo de energia, gerando imagens mais claras (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007).

Os Índices de Vegetação (IV), modelos matemáticos utilizados para avaliação de cobertura vegetal que geram imagens capazes de indicar comportamentos distintos entre solo exposto e vegetação (MARCUSSEI et al., 2010; ABREU; COUTINHO, 2014), combinados com outras variáveis extraídas de imagens de sensoriamento remoto permitem estimativas de volume, biomassa e estoque de carbono. (FERRAZ et al., 2014). Esses índices e os métodos de análise deverão ser bem escolhidos, de acordo com as características das imagens e da área de estudo, uma vez que a partir deles questões ecológicas e de estimativas de parâmetros biofísicos das florestas, em escalas espacial e temporal, poderão ser preditos. (LAWLEY et al., 2016). Por fim, observa-se que dados obtidos em campo têm sido direcionados para calibrar e validar os índices e outras medições obtidos pelo sensoriamento remoto, garantindo assim melhoria nas estimativas das variáveis de campo (LAWLEY et al., 2016).

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

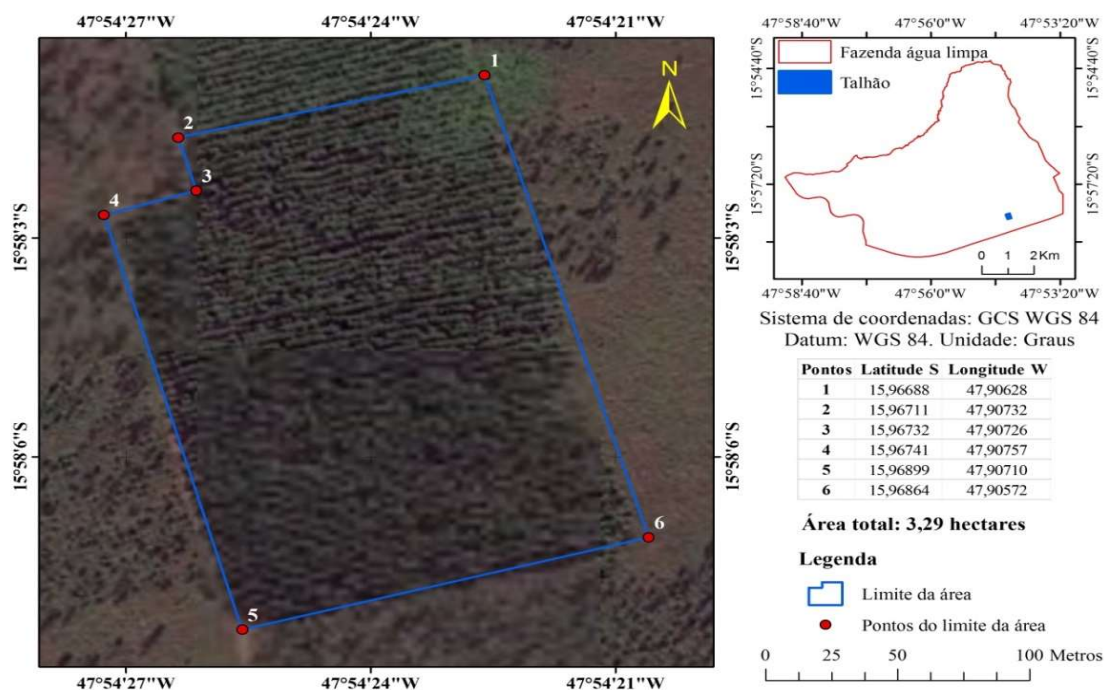
### **4.1. Caracterização da área de estudo**

O estudo foi realizado em um povoamento de *Eucalyptus* sp. de 07 (sete) anos de idade, implantado na Fazenda Água Limpa (FAL), propriedade da Universidade de Brasília, localizada em Brasília, DF. A FAL é limitada ao norte pelo Ribeirão do Gama e o Núcleo Rural da Vargem Bonita e ao sul pela BR 251, ao leste pelo Córrego Taquaras e a oeste com a estrada de ferro e o Country Club de Brasília (FAL, 2009).

Além de fazer parte da Área de Proteção Ambiental (APA) das Bacias do Gama e Cabeça de Veado, a FAL possui em seu interior uma Área Relevante de Interesse Ecológico – ARIE Capetinga/Taquara, que também é conhecida como Estação Ecológica da Universidade de Brasília (FAL, 2009). Cerca de 50% da área é destinada a preservação, o restante é destinado à pesquisa e extensão, servindo como local de práticas dos cursos de Engenharia Florestal, Agronomia e Medicina Veterinária da Universidade de Brasília.

O povoamento ocupa uma área total de 3,29 hectares (Figura 1) e é composto pelo clone *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake x *Eucalyptus grandis* Hill ex-Maiden. O plantio foi realizado em 2010 num espaçamento 3 x 2 m. O solo que predomina na região é do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo, pobre em nutrientes e com alto teor de alumínio (EMBRAPA, 2013) e, quanto ao clima, o local é classificado como Aw, conforme classificação de Koppen, com

temperatura máxima de 28,5 °C e mínima de 12 °C, precipitação média anual de 1.600 mm. (FIEDLER et al., 2004).



**Figura 1.** Povoamento de *Eucalyptus sp.* localizado na Fazenda Água Limpa (FAL) - DF. Imagem retirada do *Google Earth* em dezembro 2017.

## 4.2. Metodologia

Este trabalho foi dividido em duas etapas. A primeira etapa envolveu o inventário florestal do povoamento, com uma rigorosa cubagem de árvores selecionadas e seleção de amostras (folhas, fuste e galhos) dessas árvores para quantificação de biomassa. Para o inventário, foram selecionadas aleatoriamente na área 40 parcelas de 100 m<sup>2</sup> (10 x 10 m), totalizando uma área amostral de 4.000 m<sup>2</sup>.

A segunda etapa consistiu em obter dados derivados do sensoriamento remoto e, a partir deles, ajustar equações para estimativa de volume e biomassa. Sequencialmente, os dados obtidos pelo inventário tradicional foram utilizados para validação das estimativas feitas a partir dos dados derivados das imagens.

### **4.3. Informações do sensor e da imagem aérea**

Utilizou-se uma imagem aérea cedida pela Agência de Desenvolvimento do Distrito Federal (TERRACAP). A imagem foi obtida em 2017 com uma câmera Ultracam XP e possui resolução espacial de 25 cm, o que lhe confere boa aferição de feições no terreno.

Em relação à sua resolução espectral, a imagem possui 3 bandas no visível e 1 no infravermelho próximo, característica que orientou a escolha dos índices de vegetação utilizados.

### **4.4. Inventário Florestal**

O inventário florestal do povoamento foi realizado em novembro de 2017, sendo alocadas aleatoriamente 40 unidades amostrais de dimensões 10 m x 10 m (100 m<sup>2</sup>). Em cada parcela foi mensurado o DAP (diâmetro à altura do peito, tomado a 1.30 m do solo) de todos os indivíduos vivos contidos na parcela por meio de fita dendrométrica. Foram mensuradas apenas árvores com  $DAP \geq 5.00$  cm. A altura total (Ht) das árvores também foi mensurada utilizando hipsômetro Suunto. As árvores foram enumeradas sequencialmente em cada parcela utilizando etiquetas de alumínio. No total foram amostradas 569 árvores. As estimativas dos parâmetros da população foram calculadas segundo Pellico-Netto; Brena, 1997, conforme Tabela 1:

**Tabela 1.** Estimativas utilizadas para processamento de inventário florestal.

| Estimativa                  | Fórmula   |
|-----------------------------|---|
| Média                       | $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n Xi}{n}$                 |
| Variância                   | $S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Xi - \bar{x})^2}{N - 1}$ |
| Variância da média          | $S_{\bar{x}}^2 = \frac{S_x^2}{n} * (1 - f)$           |
| Fração de amostragem        | $f = \frac{n}{N}$                                     |
| Erro padrão da média        | $s_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}} * \sqrt{(1 - f)}$ |
| Coefficiente de Variação    | $CV = \frac{S_x}{\bar{x}} * 100$                      |
| Erro de amostragem absoluto | $E_{abs} = \pm t * s_{\bar{x}}$                       |
| Erro de amostragem relativo | $E_{rel} = \frac{\pm t * s_{\bar{x}}}{\bar{x}} * 100$ |
| Intervalo de Confiança      | $IC = \bar{x} \pm E_{abs}$                            |

#### 4.5. Cubagem Rigorosa

Para cubagem rigorosa foram selecionadas 39 árvores pertencentes a diferentes classes de diâmetros próximas às unidades amostrais. As árvores foram derrubadas a 10 cm do solo com o uso de motosserra, e seu diâmetro inicial medido neste ponto.

O diâmetro das seções subsequentes foram mensurados a 0.50 m; 1.30 m e, a partir daí, de 1 em 1 metro, até altura da ponta. Para cubagem rigorosa foi utilizado o método de Smalian. Assim, o volume de cada seção foi obtido pelo produto da média aritmética das áreas seccionais de seus extremos pelo seu comprimento.

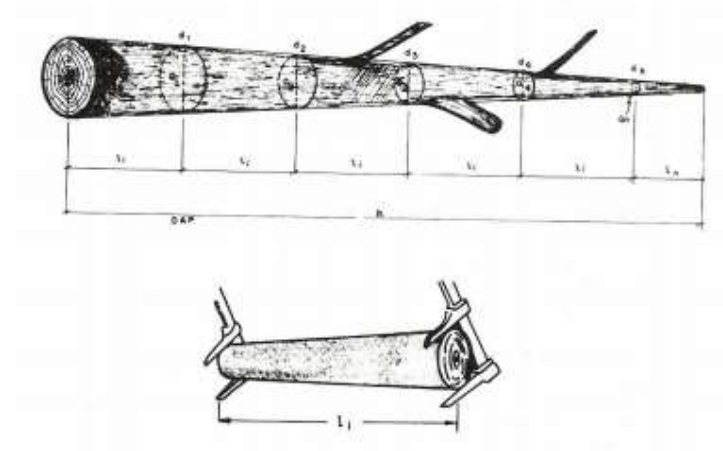
A última seção teve seu volume calculado considerando apenas 1/3 da área da seção. A fórmula para cálculo de área e de volume das seções são:

$$g = \frac{\pi d^2}{4}$$

Em que  $g$  é a área da seção;  $d^2$  é o diâmetro da seção elevado ao quadrado e  $Ap$  é a área de ponta considerada para cálculo de volume.

$$V_{seção} = \frac{g_n + g_{n+1}}{2} * L$$

Em que:  $V_{seção}$  é o volume da seção;  $g_n$  é a área da seção  $n$ ;  $g_{n+1}$  é a área da seção  $n+1$ ;  $L$  é o comprimento da seção conforme Figura 2.



**Figura 2.** Procedimento adotado para cubagem rigorosa por Smalian. (FINGER, 1992)

#### 4.6. Quantificação de Biomassa

Imediatamente após a cubagem, todas as árvores cubadas foram seccionadas e seus compartimentos (folhas, fuste e galhos) pesados separadamente em campo com balança eletrônica de plataforma com capacidade para 300 kg precisão  $\pm 0.5$  Kg.

Amostras dos compartimentos de todas as árvores, de massa variável no intervalo de 50 a 300 g, foram retiradas e levadas a laboratório e tiveram sua massa verde mensurada com balança analítica de precisão de 0.01 g. Em seguida, foram submetidas a estufa a uma temperatura constante de  $103 \pm 2^\circ$  C para o material lenhoso e a  $75 \pm 2^\circ$  C para as folhas (SMITH, 1954), até atingir o peso constante, para posterior determinação da massa seca.

Com a massa verde e a massa seca das amostras, foi possível gerar um coeficiente de relação para estimativa de biomassa (SOARES et al., 2006):

$$Cr = \frac{M_s}{M_u}$$

Em que Cr = coeficiente de relação; Ms = massa seca (g ou kg); Mu = massa úmida (g ou kg).

O coeficiente gerado foi utilizado para estimar a biomassa seca de todas as árvores que foram seccionadas e tiveram seus compartimentos pesados em campo, por meio da equação:

$$Bo_c = c_r * P_{uc}$$

Em que Bo<sub>c</sub> = biomassa seca do compartimento (kg ou tonelada); Cr = coeficiente de relação; P<sub>uc</sub> = peso úmido do compartimento (kg ou tonelada).

#### 4.7. Estimativa de volume e biomassa

Com base nos dados do inventário, na cubagem rigorosa e na quantificação de biomassa, foram ajustados três modelos estatísticos de regressão (Tabela 2) visando a estimativa de volume e de biomassa de árvores individuais. O ajuste foi realizado com dados de 33 árvores cubadas, selecionadas aleatoriamente. As seis árvores restantes foram utilizadas para a validação dos modelos selecionados a partir do Teste “t” para dados pareados (p < 0.05).

A partir dos ajustes dos modelos, foram estimados os volumes e as biomassas individuais, sequencialmente para a parcela e em seguida extrapolado por hectare o volume em (m<sup>3</sup>/ha) e a biomassa (kg/ha).

**Tabela 2.** Modelos matemáticos ajustados para estimativa de volume e biomassa utilizando parâmetros biofísicos.

| Autor           | Modelo   |
|-----------------|--|
| Meyer           | $Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot Dap + \beta_2 \cdot Dap^2 + \beta_3 * Dap \cdot Ht + \varepsilon$ |
| Schumacher-Hall | $Y = \beta_0 \cdot Dap^{\beta_1} \cdot Ht^{\beta_2} + \varepsilon$                             |

Em que  $\beta$ 's são os coeficientes a serem ajustados; Dap é o diâmetro à altura do peito; Ht é a altura total;  $\varepsilon$  é o erro associado ao modelo.

#### 4.8. Determinação de Índices de Vegetação

Utilizando a imagem aérea cedida pela TERRACAP e o *software ERDAS*, foram calculados dois índices de vegetação para o povoamento: Índice Ajustado de Vegetação Modificado (MSAVI) e Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI). (Figuras 7 e 8)

Todas as unidades amostrais tiveram seu centro georreferenciado em campo com auxílio de um GPSMAP 60 CSx. Com as coordenadas obtidas em campo, os limites das parcelas foram delimitados e os valores médios dos índices extraídos. Tais valores correspondem à média dos índices de 400 pixels contidos em cada unidade amostral (10 m x 10 m) os quais foram utilizados como variáveis preditoras no ajuste dos modelos para estimativa de volume e biomassa por unidade de área.

##### 4.8.1. Índice de Vegetação Ajustado para o Solo Modificado (MSAVI)

Este índice foi criado por Qi et al., (1994) e sua principal característica é o fato de visa amenizar o efeito de solo. Visa aprimorar outros índices de solo, como o Índice de Vegetação Normalizada (NDVI). Seus valores variam de -1 a +1 e seu cálculo é dado pela equação a seguir:

$$MSAVI = \frac{(Nir - Red) * (1 + L)}{(Nir + Red + L)}$$

Em que Nir é o pixel no infravermelho próximo (banda 4); Red é o pixel onde a reflectância ocorre no vermelho (banda 3) e L é o fator de correção do brilho do solo, para qual adotou-se 1.2, padrão seguido por Qi et al. (2008).

##### 4.8.2. Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI)

Este índice foi desenvolvido por Rouse et al. (1973) e tem sido amplamente aplicado em estudos de dinâmica de vegetação, produção de biomassa, impactos de pastagem, sequestro de carbono, entre outros (FULLER, 1998; REEVES et al., 2001; KURTZ et al., 2009;

GILMANOV et al., 2004). Seus valores variam de -1 a +1 e pode ser obtido pela seguinte equação:

$$NDVI = \frac{Nir - Red}{Nir + Red}$$

Onde Nir é o pixel no infravermelho próximo (banda 4) e Red é o pixel onde a reflectância ocorre no vermelho (banda 3).

Em imagens NDVI, quanto alto o valor do pixel, mais densa é a vegetação em foco, enquanto que quanto mais baixo o valor do pixel, o alvo corresponderá a áreas urbanas, solo exposto e água. (ROSEMBACK et al., 2005).

#### **4.9. Escolha dos melhores modelos**

A escolha dos melhores modelos ajustados para estimativa de volume e de biomassa foi baseada na análise do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado), erro padrão da estimativa percentual ( $S_{yx\%}$ ) e distribuição de resíduos, calculada pela diferença entre o valor (volume ou biomassa) observado e valor estimado. (DRAPER; SMITH, 1998)

#### **4.10. Comparação entre os resultados do inventário florestal e dos índices de vegetação**

A partir dos dados do inventário florestal e das variáveis do sensoriamento remoto, procedeu-se com novo ajuste de equações para estimativa de volume e de biomassa por unidade de área. Após tentativas e combinação de vários índices de vegetação, chegou-se ao melhor resultado, cuja variável independente foi dada por:

$$x = G.MSAVI.NDVI$$

Onde x é a variável independente; G é a área basal em  $m^2/ha$ ; MSAVI e NDVI são os valores médios dos índices de vegetação de cada parcela/hectare. Os modelos utilizados no ajuste estão dispostos na Tabela 3:



**Tabela 3.** Modelos ajustados para estimativa de volume e biomassa a partir de variáveis do sensoriamento remoto.

| Modelo    | Equação   |
|-----------|---|
| Gompertz  | $y = \alpha e^{-e^{\beta-\gamma x}}$                |
| Ratkowsky | $y = \frac{\alpha}{(1 + e^{\beta-\gamma x})}$       |
| Logístico | $y = \frac{\alpha}{(1 + (\frac{x}{\beta})^\gamma)}$ |

Em que y é a variável de interesse (volume ou biomassa); x é a variável independente (x= G.MSAVI.NDVI);  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são os coeficientes a serem ajustados.

Para o ajuste dos modelos, foram utilizados os dados de 33 parcelas inventariadas. As demais 07 parcelas foram utilizadas para validação dos modelos ajustados, com base no Teste “t” de médias pareadas ( $p < 0.05$ ).

Uma vez selecionados os modelos e estimados o volume e a biomassa da parcela, comparou-se as estimativas oriundas do inventário florestal tradicional com as estimativas que utilizaram os índices de vegetação e área basal.

O valor de P foi utilizado para avaliar a existência de diferença significativa entre as estimativas de volume e biomassa utilizando informações de sensoriamento remoto, e utilizando dados do inventário tradicional.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

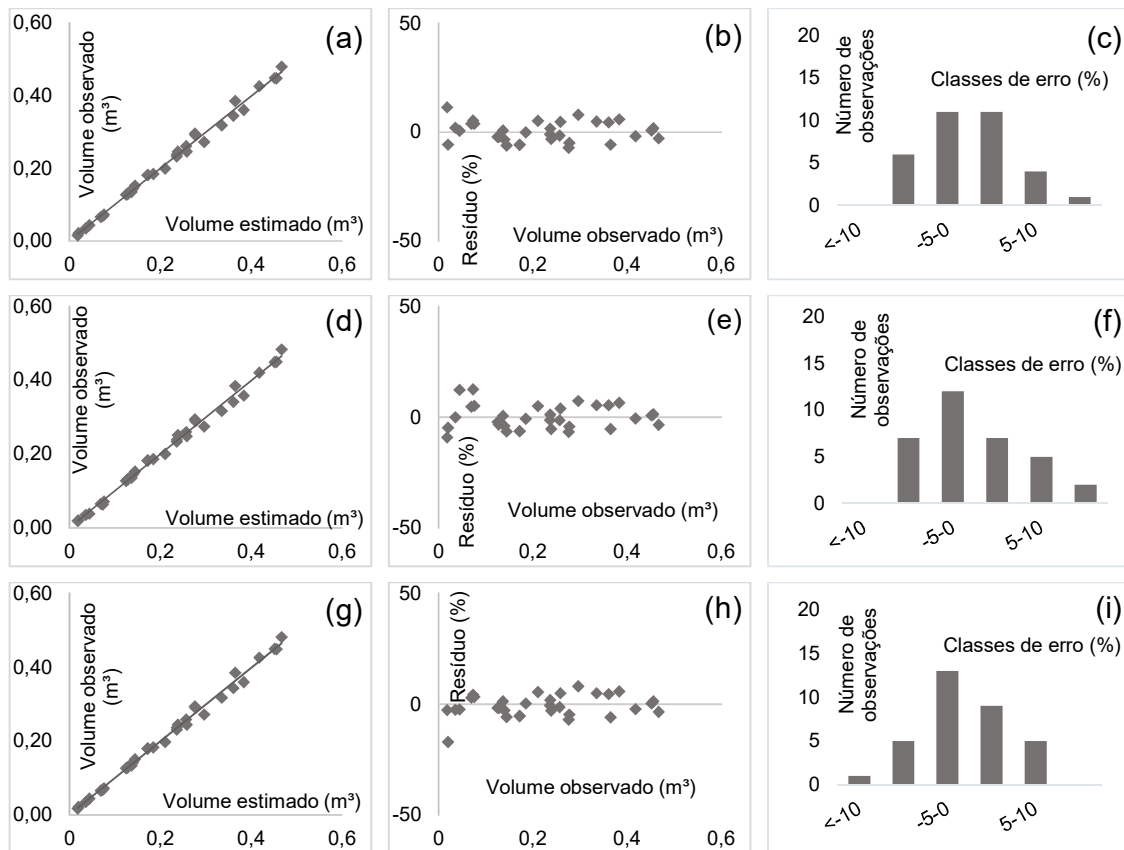
### 5.1. Ajuste e seleção de modelos matemáticos para estimativa de volume e biomassa de árvores individuais.

Para estimativa de volume, os três modelos apresentaram coeficientes de determinação ajustados ( $R^2$  ajustado) superiores a 0.99 e erros padrão da estimativa percentuais inferiores a 6%. Estes valores são consistentes e aceitáveis (Tabela 4).

**Tabela 4.** Resultados estatísticos do ajuste de modelos para estimativa de volume em m<sup>3</sup> por indivíduo utilizando variável DAP e altura.

| Modelo          | $\beta_0$ | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | Syx   | Syx%  | R <sup>2</sup> ajustado |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|-------------------------|
| Schumacher-Hall | 0.00005   | 1.949     | 0.989     |           | 0.011 | 5.070 | 0.997                   |
| Meyer           | 0.060     | -0.020    | 0.001     | 0.001     | 0.012 | 5.320 | 0.992                   |
| Spurr           | 0.004     | 0.000     |           |           | 0.011 | 5.020 | 0.993                   |

Na análise gráfica dos ajustes para estimativa de volume (Figura 3), observou-se que o modelo de Schumacher-Hall apresentou uma distribuição mais homogênea dos dados em torno da linha média estimada ou ajustada, (a). Em termos de classes de erro, todos os modelos apresentam mais erros no intervalo intermediário (- 5 a 5) e o modelo de Schumacher-Hall teve uma distribuição mais simétrica que os demais (c). Em termos de dispersão residual, o modelo de Spurr apresentou seus dados mais dispersos em torno da média (h), enquanto o modelo de Schumacher-Hall (b) apresentou os dados mais homogêneos, distribuídos e mais próximos de zero.



**Figura 3.** Gráficos de dispersão de valor estimado por valor observado, dispersão de resíduos e distribuição em classes de erro obtidos para os ajustes de equações para estimativa de volume. Em que (a), (b) e (c) são referentes ao modelo de Schumacher-Hall; (d), (e) e (f) ao modelo de Meyer; (g), (h) e (i) ao modelo de Spurr.

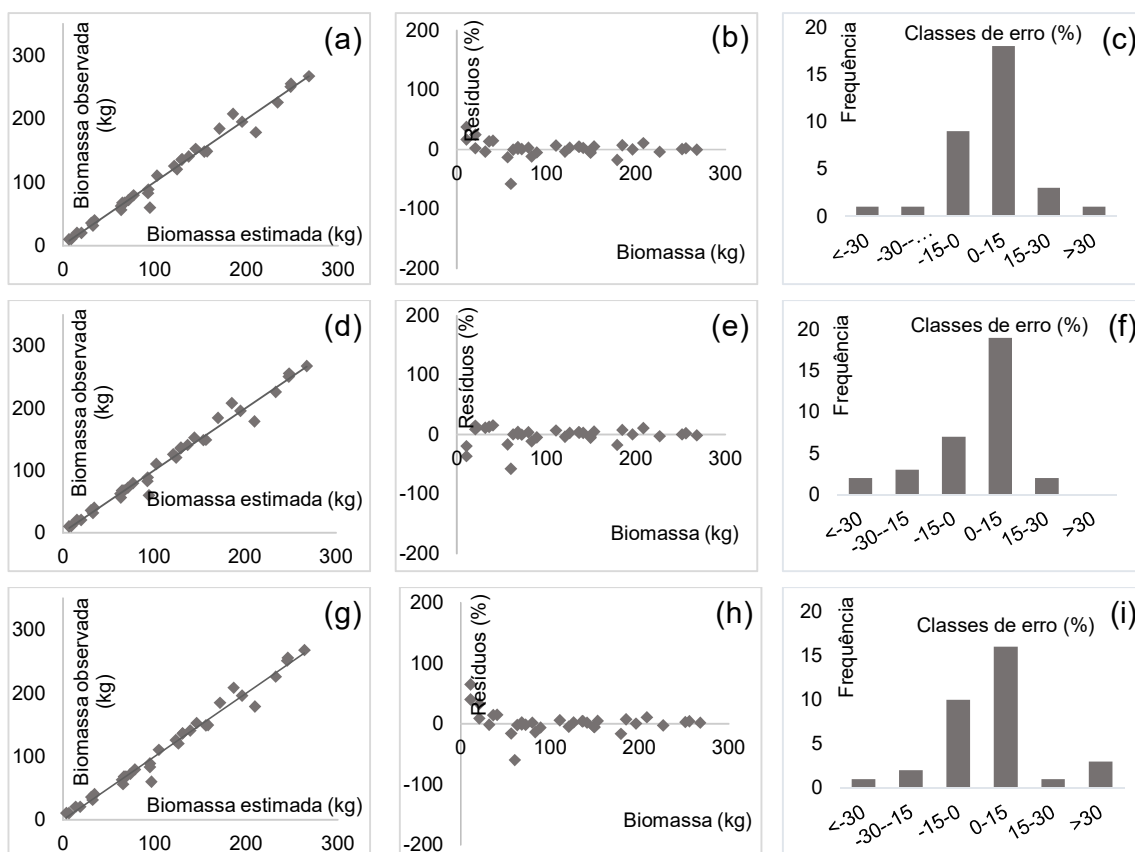
Para a estimativa de biomassa, os três modelos também apresentaram coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado) e erro padrão da estimativa percentual ( $S_{yx\%}$ ) satisfatório e próximos (Tabela 5), todavia, existe ligeira perda de precisão, quando comparadas com as estatísticas de volume, resultado este esperado, haja vista que na estimativa da biomassa houve inclusão de mais uma variável independente, que foi a densidade.

**Tabela 5.** Resultados estatísticos do ajuste de modelos para estimativa de biomassa em kg por indivíduo utilizando variável DAP e altura.

| Modelo          | $\beta_0$ | $\beta_1$ | $\beta_2$ | $\beta_3$ | Syx    | Syx% | $R^2$ ajustado |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|------|----------------|
| Schumacher-Hall | 0.013     | 2.154     | 1.006     |           | 11.052 | 9.59 | 0.990          |
| Meyer           | 59.986    | -16.411   | 0.828     | 0.298     | 11.198 | 9.71 | 0.978          |
| Spurr           | -4.369    | 0.021     |           |           | 11.161 | 9.68 | 0.978          |

Quanto a análise gráfica dos ajustes para estimativa de biomassa (Figura 4), observou-se que o modelo de Meyer apresentou resíduos mais homogêneos e distribuídos em torno da média em sua dispersão residual (e) quando biomassa inferior a 50 kg. A partir deste ponto, no entanto, a distribuição de Meyer (e) e Schumacher-Hall (b) são muito similares.

A distribuição em dos erros (%) na figura 4 mostram que os três modelos têm maior tendência a superestimar a variável biomassa, sendo o modelo de Spurr o mais expressivo (i). Também, a análise de biomassa estimada por biomassa observada mostraram distribuição muito similar entre os três modelos.



**Figura 4.** Gráficos de dispersão de valor estimado por valor observado, dispersão de resíduos e distribuição em classes de erro obtidos para os ajustes de equações para estimativa de biomassa. Em que (a), (b) e (c) são referentes ao modelo de Schumacher-Hall; (d), (e) e (f) ao modelo de Meyer; (g), (h) e (i) ao modelo de Spurr.

Após a obtenção das equações ajustadas, procedeu-se com um teste de validação para verificação da eficiência da equação selecionada. Para tanto, foram utilizadas as 06 árvores amostras que não foram utilizadas no ajuste das equações.

O Teste “t” para médias pareadas mostrou que todos os ajustes foram eficientes e significativos na estimativa de volume e biomassa, não existindo, portanto, diferença significativa entre a variável estimada e a observada, conclusão obtida a partir dos valores “P” obtidos para todos os modelos, quando comparados considerando um nível de significância de 5%, conforme Tabela 6:

**Tabela 6.** Resultados obtidos pelo Teste T de médias pareadas aplicado para validação do ajuste dos modelos que estimaram volume e biomassa a nível de indivíduo. Realizado com valores das 06 árvores não utilizadas no ajuste.

| Modelo          | Volume                 |                     |          | Biomassa               |                     |          |
|-----------------|------------------------|---------------------|----------|------------------------|---------------------|----------|
|                 | P <sub>calculado</sub> | P <sub>α 0.05</sub> | Situação | P <sub>calculado</sub> | P <sub>α 0.05</sub> | Situação |
| Schumacher-Hall | 0.38                   | 0.05                | ns       | 0.87                   | 0.05                | ns       |
| Meyer           | 0.49                   | 0.05                | ns       | 0.96                   | 0.05                | ns       |
| Spurr           | 0.4                    | 0.05                | ns       | 0.84                   | 0.05                | ns       |

Em que: P<sub>calculado</sub> é valor de P (T<=t) bi-caudal; P<sub>α 0.05</sub> é o valor de referência; ns é não significativo.

Após as análises de ajuste e precisão, análise gráfica de resíduo o qual segundo SANQUETTA et al. (2014), é de grande relevância pois, esta consegue detectar vieses e *outliers* que possam comprometer a qualidade da estimativa e dos critérios tradicionais de ajuste (R<sup>2</sup> ajustado, S<sub>yx</sub> e S<sub>yx%</sub>), e validação.

Todos os modelos ajustados podem ser utilizados, uma vez que suas estatísticas são semelhantes e precisas. Este estudo, porém, optou pelo modelo de Schumacher & Hall, pois dentre os modelos utilizados na estimativa de volume e biomassa, este é considerado um dos modelos superiores e mais usual no meio florestal (SILVA et al, 2009; DOBNER et al., 2013; BARRIOS et al., 2014; TRILLERAS et al.; 2014; MULLER et al., 2014; RE et al., 2015; TONINI; BORGES, 2015; BINOTI et al., 2016; MAYAKA et al. 2017; RAMOS et al. 2017) Desse modo, os modelos ajustados de Schumacher-Hall foram utilizados estimar volume e biomassa das 569 árvores amostradas no inventário florestal.

## 5.2. Inventário Florestal tradicional

Após a seleção das melhores equações ajustadas, foram estimados os volumes e biomassas individuais de todas as árvores nas suas respectivas parcelas e, posteriormente, tais valores foram extrapolados por hectare.

O coeficiente de variação (%) de ambas variáveis estimadas (volume e biomassa) ficou em torno de 17%, o que indica média heterogeneidade do povoamento (GOMES; GARCIA,

2002), haja vista que o CV% faz inferência da dispersão em torno da média, ainda que seja em uma escala adimensional.

O volume de madeira teve uma média de 330.35 m<sup>3</sup>/ha, desvio padrão de 57.35 m<sup>3</sup>/ha erro amostral absoluto de 17.19 m<sup>3</sup>/ha e quando analisado em porcentagem 5.20%. Esses valores médios de produção em volume estão dentro do padrão observados em outros estudos (CASTRO et al., 2013; PAES et al., OLIVEIRA et al., 2014; FERRARI et al., 2015; SOUZA et al. 2015)

A biomassa média estudada foi 173.41 t/ha, desvio padrão da média de 31.14 t/ha com erro amostral absoluto de 9.34 t/ha e quando analisado em porcentagem de 5.38% . Para o cálculo de ambas as variáveis considerou-se um nível de significância de 5% conforme Tabela 7.

**Tabela 7.** Estimativas dos parâmetros do povoamento obtidas pelo inventario florestal utilizando equação de Schumacher-Hall ajustada para estimativa de volume e de biomassa.

|                        | Volume  | Unidade                           | Biomassa | Unidade             |
|------------------------|---------|-----------------------------------|----------|---------------------|
| Média                  | 330.35  | m <sup>3</sup> /ha                | 173.41   | t/ha                |
| Variância              | 3289.34 | (m <sup>3</sup> /ha) <sup>2</sup> | 969.9    | (t/ha) <sup>2</sup> |
| Desvio Padrão          | 57.35   | m <sup>3</sup> /ha                | 31.14    | t/ha                |
| CV (%)                 | 17.36   | %                                 | 17.96    | %                   |
| Variância da media     | 72.24   | (m <sup>3</sup> /ha) <sup>2</sup> | 21.3     | (t/ha) <sup>2</sup> |
| Erro padrão da média   | 8.50    | m <sup>3</sup> /ha                | 4.62     | t/ha                |
| Erro amostral absoluto | 17.19   | m <sup>3</sup> /ha                | 9.34     | t/ha                |
| Erro amostral relativo | 5.20    | %                                 | 5.38     | %                   |

Em que CV (%) é Coeficiente de Variação Percentual.

### 5.3. Correlação entre variáveis do povoamento e índices de vegetação

Conforme mostrado na Tabela 8, nota-se que há grande correlação entre a variável independente área basal com as variáveis dependentes, enquanto que há baixa correlação entre as variáveis independentes espectrais NDVI e MSAVI com volume e biomassa. Embora as correlações entre as variáveis do povoamentos e os índices de vegetação tenham sido baixas, seus valores foram significativos ( $p < 0.05$ ).

Observa-se ainda que as correlações em módulo ou valor absoluto entre as variáveis do povoamento (volume, biomassa e área basal) e os índices de vegetação (MSAVI e NDVI) foram muito similares. O volume apresentou correlação ligeiramente superior quando comparado à área basal e biomassa. No entanto, considerando que a variável área basal é altamente correlacionada com as variáveis volume e biomassa, e que sua correlação com as índices de vegetação, apesar de ter sido baixa, foi significativa, igualmente ao observado para volume e

biomassa, decidiu-se pela utilização desta variável, em combinação com os índices de vegetação, para gerar modelos de regressão visando estimar as variáveis de interesse, ou seja, volume e biomassa. Assim, foi dispensada a utilização da da variável altura, pois a obtenção da variável altura em campo implica em um processo moroso e oneroso.

A variável área basal, além de ser altamente correlacionada com volume e biomassa, é de fácil obtenção em campo, envolvendo menor tempo e menor custo na coleta. Segundo Ponzoni et al (2012), a área basal é derivada do diâmetro da árvore que está relacionado diretamente com o diâmetro das copas e, consequentemente, com as reflectâncias das mesmas.

Portanto, a combinação da variável área basal com índices de vegetação relacionados com a reflexão de radiação pela vegetação pode ser uma alternativa viável para estimar biomassa e volume com precisão, utilizando técnicas menos onerosas, sem necessidade de variáveis de difícil obtenção em campo, como é o caso da altura. Vale destacar ainda que a baixa correlação entre os índices de vegetação e as variáveis do povoamento se deve à resolução espacial da imagem utilizada, que foi de 25 cm. Tal resolução capta variações causadas pela sombra.

Chen et al. (2004) trabalharam imagens de satélite IKONOS com diferentes resoluções (30, 10 e 4 m) e verificaram que imagens de maiores resoluções espaciais têm menores correlações com a vegetação devido à maior influência de sombras em seus dados. Assim, variações nos valores de correlação entre índices de vegetação e variáveis do povoamento obtidas em campo podem ser decorrentes da resolução espacial das imagens utilizadas ou, conforme Ponzoni (2001), deve ser considerado também o efeito da atmosfera e do solo.

**Tabela 8.** Coeficientes de correlação entre a área basal, volume e biomassa e índices de vegetação.

|                                 | Área basal<br>(m <sup>2</sup> /ha) | Biomassa<br>(t/ha) | Volume<br>(m <sup>3</sup> /ha) | NDVI   | MSAVI |
|---------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------------------|--------|-------|
| Área basal (m <sup>2</sup> /ha) | 1                                  |                    |                                |        |       |
| Biomassa (t/ha)                 | 0.977*                             | 1                  |                                |        |       |
| Volume (m <sup>3</sup> /ha)     | 0.982*                             | 0.998*             | 1                              |        |       |
| NDVI                            | 0.35*                              | -0.32*             | -0.39*                         | 1      |       |
| MSAVI                           | 0.34*                              | 0.34*              | 0.41*                          | 0.968* | 1     |

\* Significativo a 95% de probabilidade.

Almeida et al. (2014) utilizou imagens TM Landsat 5 em área de da Caatinga e verificaram que a variável área basal (m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>) não teve correlação significativa com nenhuma variável oriunda de sensoriamento remoto.

Reis et al. (2018) utilizaram os índices de vegetação MSAVI e NDVI para predição de volume e observou boa correlação entre esses índices e a variável volume (NDVI = 0.49 e MSAVI = 0.45).

Berra et al. (2012) trabalharam com o índice NDVI para estimativa de volume em povoamento de eucalipto e obteve alta correlação entre o índice e a variável volume (NDVI = 0.79).

As variações das correlações entre os índices e variáveis de campo pode ser devido à resolução espacial das imagens, e outra explicação, conforme Ponzoni (2001), é devido à natureza da própria imagem de satélite as quais são captadas por um sensor remoto, e podem ser influenciadas por outros fatores, como atmosfera e solo.

#### 5.4. Ajuste de modelos para estimativa de volume e biomassa a nível de povoamento utilizando índices de vegetação e área basal

Os três modelos ajustados por análise de regressão visando estimativa de volume e de biomassa a partir da combinação de índices de vegetação, MSAVI e NDVI, e área basal apresentaram estatísticas satisfatórias e muito semelhantes. (Tabela 9)

**Tabela 9.** Resultados estatísticos do ajuste dos modelos para estimar volume (m<sup>3</sup>/ha) a partir de índices de vegetação (MSAVI e NDVI).

| Modelo    | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | R <sup>2</sup> ajustado | Syx (m <sup>3</sup> /ha) | Syx (%) |
|-----------|----------|---------|----------|-------------------------|--------------------------|---------|
| Ratkowsky | 455.8    | 0.9588  | 0.0066   | 0.916                   | 24.69                    | 7.44    |
| Gompertz  | 482.17   | 0.3951  | 0.0047   | 0.916                   | 24.67                    | 7.43    |
| Logístico | 1055.5   | 873.75  | -0.718   | 0.915                   | 24.73                    | 7.45    |

Em que R<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação; Syx é o erro padrão da estimativa; Syx% é o erro padrão da estimativa percentual e  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são os coeficientes ajustados dos modelos

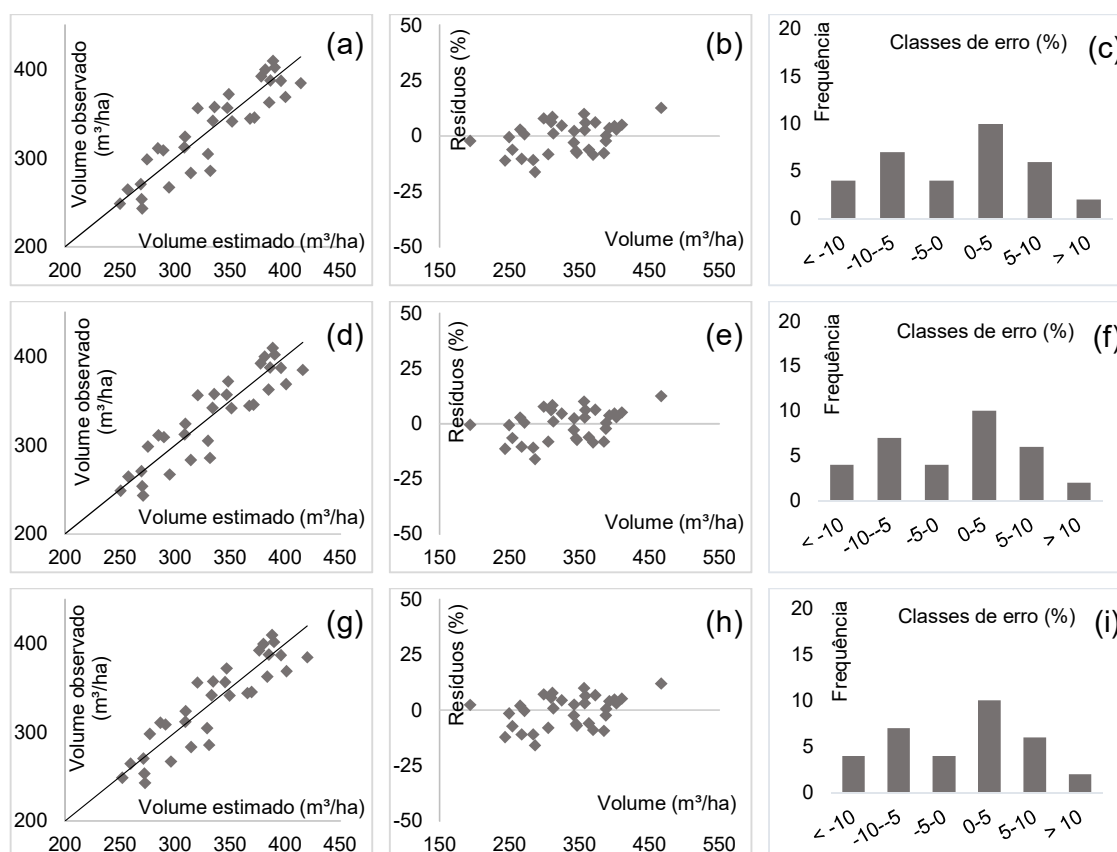
Berra et al. (2012) utilizando de imagens de satélite Landsat e o índice de vegetação NDVI, obtiveram uma equação que explica 61% da variabilidade do volume de madeira em espécies de eucalipto (R<sup>2</sup> ajustado = 0.61) e com erro padrão da estimativa percentual de 25.40%. Esses autores também concluíram que modelos que utilizam os índices de vegetação foram melhores que aquelas que utilizaram apenas bandas espectrais individuais.

Miguel et al. (2015) utilizaram área basal e índices de vegetação para estimativa de volume e biomassa em um fragmento de cerradão em Tocantins. Obtiveram um R<sup>2</sup> de 0.96 e 0.91 para volume e biomassa respectivamente, bem como Syx% de 11.92% e 22.76%. Assim, este estudo apresentou Syx% menores aos observados no estudo citado. Este fato pode ser influenciado pela natureza das florestas que constituem o objeto de interesse, os referidos



autores, desenvolveram equações para floresta nativa, portanto maior heterogênea, enquanto que este estudo trata de um povoamento florestal homogêneo

Ao utilizar os índices de vegetação e área basal para estimar o volume do povoamento independente dos modelos, todos tiveram comportamento estatístico parecido. Este mesmo comportamento foi verificado, na distribuição gráfica dos resíduos (Figura 5). Após avaliados os critérios de ajuste e precisão e gráfico de resíduos, observa-se que todos os modelos foram muito semelhantes, e podem ser utilizados.



**Figura 5.** Gráficos de dispersão de valor estimado por valor observado, dispersão de resíduos e distribuição em classes de erro obtidos para os ajustes de equações para estimativa de volume em  $m^3$  por hectare ( $m^3/ha$ ) utilizando índices de vegetação e área basal. Em que (a), (b) e (c) são referentes ao modelo de Ratkowsky; (d), (e) e (f) ao modelo de Gompertz; (g), (h) e (i) ao modelo Logístico.

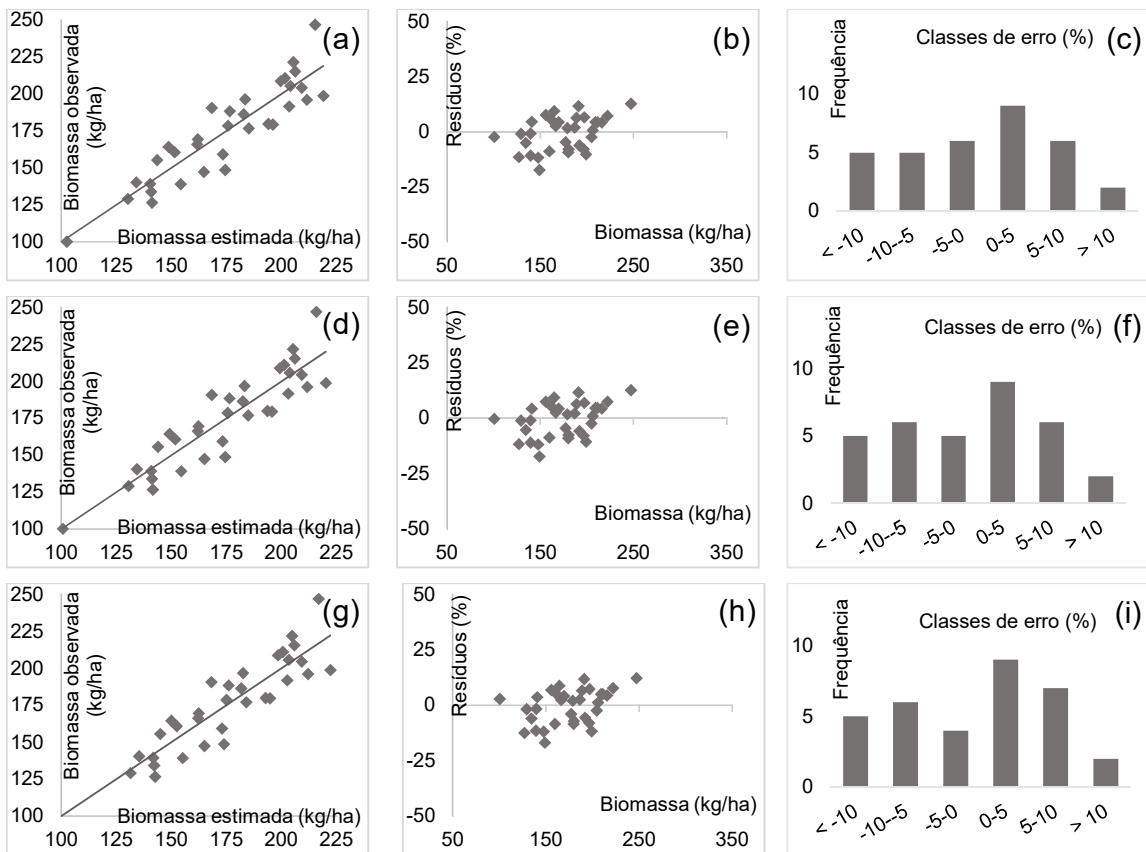
Para estimativa de biomassa, assim como na estimativa do volume, todos os modelos apresentam valores das estatísticas de ajuste e precisão semelhantes como pode ser observado na (Tabela 10), com ligeira perda de precisão. Tal perda era esperada, pois a biomassa é uma variável mais complexa de ser estimada que o volume, em função da existência da densidade.

**Tabela 10.** Resultados estatísticos do ajuste dos modelos visando estimar biomassa (kg/ha) a partir dos índices de vegetação (MSAVI e NDVI).

| Modelo    | $\alpha$ | $\beta$ | $\gamma$ | R <sup>2</sup> ajustado | S <sub>yx</sub> (m <sup>3</sup> ) | S <sub>yx</sub> (%) |
|-----------|----------|---------|----------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| Ratkowsky | 241.66   | 1.002   | 0.0067   | 0.907                   | 14.10                             | 8.08                |
| Gompertz  | 256.26   | 0.4226  | 0.0047   | 0.907                   | 14.10                             | 8.08                |
| Logístico | 558.86   | 863.67  | -0.736   | 0.906                   | 14.14                             | 8.10                |

Em que: R<sup>2</sup> é o coeficiente de determinação; S<sub>yx</sub> é o erro padrão da estimativa; S<sub>yx%</sub> é o erro padrão da estimativa percentual e  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  são os coeficientes ajustados dos modelos.

Em termos de biomassa (Figura 6), a dispersão de biomassa estimada por biomassa observada do modelo de Gompertz (d) teve seus dados mais compactos em torno da linha de tendência em comparação aos outros modelos. Em termos de distribuição em classes de erro, os modelos geraram gráficos distintos entre si, mas com a similaridade de terem maioria de observações no intervalo (0 – 10). Em termos de dispersão residual, os três modelos ajustados tiveram seus resíduos distribuídos de forma homogênea. O modelo de Gompertz teve seus dados ligeiramente superiores quando comparado aos outros modelos, por outro lado o modelo Logístico apresentou observações mais dispersas.



**Figura 6.** Dispersão de valor estimado por valor observado, dispersão de resíduos e distribuição em classes de erro obtidos para os ajustes de equações para estimativa de biomassa em kg por hectare (kg/ha) utilizando índices de vegetação. Em que (a), (b) e (c) são referentes ao modelo de Ratkowsky; (d), (e) e (f) ao modelo de Gompertz; (g), (h) e (i) ao modelo Logístico.

Subsequentemente a validação dos ajustes dos modelos para o volume e biomassa foi realizada pelo Teste “t” para dados pareados, onde foram utilizadas as estimativas das 07 parcelas-testemunha não utilizadas no ajuste dos modelos. O resultado mostrou que todos os modelos apresentaram valor de  $P(T \leq t)$  maior que  $\alpha = 0.05$  (Tabela 13), logo não existem diferenças estatísticas entre os valores preditos pelos modelos, com os valores estimados pelos modelos tradicionais.

**Tabela 11.** Resultados obtidos pelo Teste T de médias pareadas aplicado para validação de ajuste de modelos que estimaram volume e biomassa a nível de povoamento. Realizado com as 07 parcelas não utilizadas no ajuste.

| Modelo    | Volume                 |                    |          | Biomassa               |                    |          |
|-----------|------------------------|--------------------|----------|------------------------|--------------------|----------|
|           | P <sub>calculado</sub> | P <sub>α 95%</sub> | Situação | P <sub>calculado</sub> | P <sub>α 95%</sub> | Situação |
| Ratkowsky | 0.42                   | 0.05               | ns       | 0.3                    | 0.05               | ns       |
| Gompertz  | 0.45                   | 0.05               | ns       | 0.32                   | 0.05               | ns       |
| Logístico | 0.50                   | 0.05               | ns       | 0.35                   | 0.05               | ns       |

Em que: P<sub>calculado</sub> é valor de P (T<=t) bi-caudal; P<sub>α 95%</sub> é o valor de referência; ns é não significativo.

Uma vez que todos os critérios de ajuste e precisão analisados apresentaram resultados satisfatórios, e todas as equações quando validadas pelo Teste “t”, não apresentam erros enviesados, todas podem ser utilizadas. Todavia em função de sua ampla aplicação em diversos estudos que envolvem modelagem em povoamentos florestais (SARMENTO et al., 2006; MACHADO e CALEGARIO, 2007; SANTOS et al., 2017), a equação oriunda do modelo de Gompertz, foi a selecionada para as estimativas do volume e da biomassa para posterior realização do inventário florestal a nível de povoamento.

### **5.5. Comparação entre estimativas de volume e biomassa obtidas por inventário florestal tradicional com os resultados das estimativas oriundas da combinação de dados derivados de sensoriamento remoto com área basal.**

A equações originárias do modelo de Gompertz que utilizam a combinação dos índices de vegetação com a área basal para estimativa de volume e biomassa quando utilizadas para as 40 parcelas demarcadas em campo, e posteriormente calculada seus estimadores e as estatísticas do inventário, obteve-se um resultado de volume médio de 331.44 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> e erro amostral relativo (Erel) de 4.71% e biomassa média de 174.24 t.ha<sup>-1</sup> e erro amostral relativo igual a 4.84% (Tabela 20). Por outro lado, quando analisados os estimadores e as estatísticas advindas do inventário tradicional, as médias foram 330.35 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup> e 173.41 toneladas.ha<sup>-1</sup> para volume e biomassa, respectivamente, com erros amostrais percentuais de 5.20% e 5.38% conforme Tabela 12.

**Tabela 12.** Quadro comparativo entre estatísticas obtidas por inventário tradicional e pela aplicação do modelo *Gompertz* ajustado.

|                        | Volume                 |                          |                                   | Biomassa               |                          |                     |
|------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------|
|                        | Inventário Tradicional | Com índices de vegetação | Unidade                           | Inventário Tradicional | Com índices de vegetação | Unidade             |
| Média                  | 330,35                 | 331.44                   | m <sup>3</sup> /ha                | 173,41                 | 174.24                   | t/ha                |
| Variância              | 3289,34                | 2717.88                  | (m <sup>3</sup> /ha) <sup>2</sup> | 969,9                  | 791.61                   | (t/ha) <sup>2</sup> |
| Desvio Padrão          | 57,35                  | 52.13                    | m <sup>3</sup> /ha                | 31,14                  | 28.14                    | t/ha                |
| CV (%)                 | 17,36                  | 15.73                    | %                                 | 17,96                  | 16.15                    | %                   |
| Variância da media     | 72,24                  | 59.69                    | (m <sup>3</sup> /ha) <sup>2</sup> | 21,3                   | 17.38                    | (t/ha) <sup>2</sup> |
| Erro padrão da média   | 8,50                   | 7.73                     | m <sup>3</sup> /ha                | 4,62                   | 4.17                     | t/ha                |
| Erro amostral absoluto | 17,19                  | 15.63                    | m <sup>3</sup> /ha                | 9,34                   | 8.43                     | t/ha                |
| Erro amostral relativo | 5,20                   | 4.71                     | %                                 | 5,38                   | 4.84                     | %                   |

Em que CV (%) é o coeficiente de variação.

As estatísticas mostram que a utilização dos índices de vegetação associado a informações de campo podem ser utilizadas com precisão na estimativa de parâmetros biofísicos de povoamento florestal. Quando processados os inventário tradicional e o inventário com informações advindos de imagens de satélites associado com a área basal, verificam médias por unidade de área semelhante tanto para o volume (330.35 m<sup>3</sup>/ha e 331.44 m<sup>3</sup>/ha, respectivamente), quanto para a biomassa (173.41 t/ha, 174.24 t/ha, respectivamente), com erro percentuais de  $\pm 5.20$  e  $4.71$  % para o volume, respectivamente, e para biomassa erros  $\pm$  de  $5.38$  % e  $4.84$  % respectivamente. (Tabela 12).

É válido mencionar que para as estimativas do volume e da biomassa por unidade de área, utilizando a combinação dos índices de vegetação com área basal, resultou em uma ligeira diminuição do erro amostral do inventário, bem como a ausência da variável altura. Estes resultados são de grande valia, pois permitem a estimativa diretas de variáveis de campo por unidade de área mais ágil e, conseqüentemente, menos oneroso.

Todavia a aplicação da técnica será válida se inicialmente forem realizadas coleta de informações em campo, pois estimativas de parâmetros biofísicos de florestas utilizando índices de vegetação tem como premissa o conhecimento da área de estudo com suas características intrínsecas. Esse cuidado se deve ao fato de que embora plantios do gênero *Eucalyptus sp.* possam apresentar semelhança em suas variáveis biofísicas, o comportamento espectral poderá ser muito diferente devido às propriedades inerentes das diversas espécies, tornando a atividade de detecção remota de dosses florestais uma atividade complexa (GALEANA-PIZANA et al., 2014; REIS et al., 2018), logo a inserção de variáveis de campo, originárias das florestas como por exemplo a área basal, a qual apresenta alta correção com dados de produção (HUSCH et al.,

1982) nos modelos, garante melhorias nos estimadores, por consequência estimativas mais acuradas.

## **6. CONCLUSÕES**

Dos modelos utilizados para estimativa de volume e biomassa individual, a equação oriunda do modelo Schumacher-Hall foi a recomendada.

O ajuste de modelos que utilizam a combinação de índices de vegetação com área basal é preciso e apresentou resultados tão bons quanto aos gerados pelo inventário florestal tradicional, no entanto, sua aplicação requer coleta prévias de dados de campo. Todavia quando ajustados, este procedimento é mais ágil, e por consequência menos oneroso, haja vista que a variável altura se torna desprezível, não sendo necessário sua obtenção.

Dos modelos ajustados por unidade de área, envolvendo a combinação de índices de vegetação com a área basal, a equação originária do modelo de Gompertz é a recomendada.

A inclusão da área basal como variável preditora é recomendada, pois é de fácil obtenção e altamente correlacionado com dados de produção.

A imagem utilizada possui alta resolução espacial e, no entanto, sua aplicação se limita à região trabalhada, haja vista não é comum ter este produto de alta qualidade disponível. Além disso, sua alta qualidade também lhe confere efeito de sombra nos pixels, que deverá ser considerado e corrigido para aplicação.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, K. M. P.; COUTINHO, L. M. Sensoriamento Remoto aplicado ao Estudo da Vegetação com Ênfase em Índice de Vegetação e Métricas da Paisagem. **Vértice**, Rio de Janeiro, v. 16. p. 173-198, 2014.

ALBA, E.; MARCHESAN, J.; PIVOTO, E.M.; TRAMONTINA, J.; ARAÚJO, E.S.; SOARES, R. P. Uso de imagens de média resolução espacial para o monitoramento de dosséis de *Eucalyptus grandis*. **Scientia Agraria**, Paraná, v. 18, p. 1-8, 2017.

ALMEIDA, A. Q.; MELLO, A. A.; DÓRIA NETO, A. L. N.; FERRAZ, R. C. Relações empíricas entre características dendrométricas da Caatinga brasileira e dados TM Landsat5. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.49, p.306-315, 2014.

BARRIOS, A.; LOPEZ, A. M.; NIETO, V. Predicción de volúmenes comerciales de *Eucalyptus grandis* a través de modelos de volumen total y de razón. **Colombia Forestal**, Colombia, v. 17, p.137-150, 2014.

BERRA, E.; BRANDELERO, C.; SOARES, R. P.; SEBEM, E.; GODOY, L. G. PAIM; A. B.; BELMONTE, D. L. Estimativa do volume total de Madeiro em Espécies de Eucalipto a partir de Imagens de Satelite LANDSAT. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, p. 853-864, 2012.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; ANDRADE, A. V.; NOGUEIRA, G. S.; ROMARCO, M. L.; PITANGUI, C. G. Máquina de Vetores de Suporte para Estimar Volume de Árvores de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 40, p.669-693, 2016.

CAMPOS, S. R.; BARROS, N. F.; LEITE, H.; COMERFORD, N., NOVAIS, R. F. Estimativa de biomassa de plantios de eucalipto no Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, p.697-706, 2008.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B.; LEITE, H. G.; SOUZA, A. L.; NOGUEIRA, G. S.; MARTINS, F. B. Individual Growth Model for *Eucalyptus* Stands in Brazil Using Artificial Neural Network. **ISRN Forestry**, v. 2013, p.1-13, 2013.

CHEN, X.; VIERLING, L.; ROWEL, E.; DEFELICE, T. Using Lidar and Effective LAI data do evaluate IKONOS and Landsat 7 ETM+ vegetation cover estimates in a ponderosa pine forest. **Remote Sensing of Environment**, Utah, v. 94, p. 14-26, 2004.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. 1981. **Applied regression analysis**. 3a. ed. New York: J. Wiley. 709 p.

DOBNER, M. TRAZZI, P. A.; HIGA, A. R.; ARCE, J. E. Growth of *Cryptomeria japonica* in Southern Brazil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, p.39-46, 2013.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 3ª edição. 2013.

FAL – Fazenda Água Limpa, Universidade de Brasília, 2009. Disponível em: <[http://www.fal.unb.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4:apresentacao&catid=2&Itemid=101](http://www.fal.unb.br/index.php?option=com_content&view=article&id=4:apresentacao&catid=2&Itemid=101)> Acesso em 10 Jan. 2018.

FERRARI, M. P.; FERREIRA, C. A.; SILVA, H. D.; TREVISAN, R. Prognose de Crescimento Volumétrico Individual de Árvores *Eucalyptus* em povoamentos na Região Centro Sul. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Brasília, v. 51, p.5-16, 2005.

FERRAZ, A. S.; SOARES, V. P.; SOARES, C. P. B.; RIBEIRO, C. A. A. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Estimativa do Estoque de Biomassa em um Fragmento Floresta usando Imagens Orbitais. **Floresta e Ambiente**, Seropédica. v. 21, p. 286-296, 2014.

FERREIRA, M. C.; SANTOS, R. C.; CASTRO, R. V. O.; CARNEIRO, A. C. O.; SILVA, G. G. C.; CASTRO, A. F. N. M.; COSTA, S. E. L.; PIMENTA, A. S. Biomass and Energy Production at Short Rotation Eucalyptus Clonal Plantations Deployed in Rio Grande do. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, p.1-7, 2017.

FIEDLER, N. C.; AZEVEDO, I. N. C.; REZENDE, A. V.; MEDEIROS, M. B.; VENTUROILI, F. Efeito de incêndios florestais na estrutura e composição florística de uma área de cerrado sensu stricto na fazenda Água Limpa-DF. **Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, v.28, p.129-138, 2004.



FINGER, C.A.G. **Fundamento de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF/FATEC, 1992, 269 p.

FOELKEL, C. EUCALYPTUS. Online Book & Newsletter: **Mini-Artigo Técnico**. 2006

FULLER, D.O. 1998. Trends in NDVI time series and their relation to rangeland and crop production in Senegal, 1987-1993. **International Journal of Remote Sensing**. Cambridge, v.19, 2018.

GALEANAJ.M.P.; LOPEZ, A.C.; LOPEZ, P.Q.; SILVAN, J.L.C.; COUTURIER, S. Modeling the spatial distribution of above-ground carbon in Mexican coniferous forests using remote sensing and a geostatistical approach. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Netherlands, v. 30, p. 179–189, 2014.

GALVÃO, L. S.; BREUNIG, F. M.; SANTOS, J. R.; TELES, T. S.; GAIDA, W.; MOURA, Y. M. Uso de imagens RapidEye no estudo das variações sazonais de índices de vegetação no Parque Estadual do Turvo (PET). **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, João Pessoa, p.1145-1152, 2015.

GARCIA, C. H. (1989). **Tabelas para classificação do coeficiente de variação**. Piracicaba: IPEF. Circular técnica, 1989, 171 p.

GILMANOV, T.G.; JOHNSON, D.A.; SALIENDRA, N.Z., AKSHALOV, K.; WYLIEN, B.K. Gross primary productivity of the true steppe in central Asia in relation to NDVI: scaling up CO<sub>2</sub> fluxes. **Environmental Management**. United States, v. 33, p. 492-508, 2004.

GÜNLÜ, A.; KAHRIMAN, A.; ERCANLI, I. Modeling stand volume using Landsat TM data for fir stands (*Abies bornmuelleriana* Matth.) located in Buyukduz planning unit, TURKEY. **Kastamonu University Journal of Forestry Faculty**, Turkey, v. 12, p.408-413, 2012.

HOLTER, M. R. 1967. Tools for the Future. **13<sup>th</sup> Annual Meeting American Astronomical Society**, Dallas, Texas. 1967.

HUANG, S. RAMIREZ, C. MCELHANEY, C. EVANS, K. Simulating spatiotemporal forest change from field inventory, remote sensing, growth modeling, and management actions. **Forest Ecology and Management**, v. 415-416, p. 26-37, 2018.

HUETE, A. A soil-adjusted vegetation index. **Remote Sensing of Environment**, New York, USA. v.25, p.295-309, 1988.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 83, p. 195-213, 2002.

HUSCH, B.; MILLER, C.L.; BEERS, T.W. **Forest mensuration**. 3 ed. New York: J. Willey, 1982. 402p.

IBÁ. **Indústria Brasileira de Árvores**. Relatório Ibá 2017. Brasília, 2017.

JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres. **Tradução da 2<sup>a</sup> edição por (pesquisadores do INPE)**.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J.C.; FREITAS, F.P.; SANTOS, L.C.; ROCHA, M.F.V. Caracterização Energética de Diferentes Espécies de Eucalyptus. **Floresta**. Curitiba, v. 47, p.11–16, 2017.

JUIZO, C. G. F.; LIMA, M.; SILVA, D. A. Qualidade da casca e da madeira de nove espécies de Eucalipto para produção de carvão vegetal. Agrária. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v. 12, p. 386–390. 2017.

JUVENAL, T. L.; MATTOS, R. L. G. O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, p.3-30, set. 2002.

KROSS, A.; MCNAIRN, H.; LAPEN, D.; SUNOHARA, M.; CHAMPAGNE, C. Assessment of RapidEye vegetation indices por index and biomass in corn and soybean crops. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Canada. v. 34, p. 235-248, 2014.

KURTZ, D.B.; SCHELLBERG, J.; BRAUN, M. G. Ground and satellite based assessment of rangeland management in sub-tropical Argentina. **Applied Geography**. United States, v. 30, p.210-220, 2009.

LAWLEY, V.; LEWIS, M.; CLARKE, K.; OSTENDORF, B. Site-based and remote sensing methods for monitoring indicators of vegetation condition: An Australian review. **Ecological Indicador**, Finland, v. 60, 2016, p. 1273-1278, 2016.

LEDA, V. C.; SANTOS, J. E. O.; FILGUEIRAS, R.; NICOLETE, D. A. P.; ZIMBACK, C. R. L. Índices de vegetação na caracterização da bacia do Ribeirão do Prata, Lençóis Paulista – SP. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, São Paulo, v. 5, p. 125-135, 2016.

LEYK, S.; KOEHL, M.; PONCET, F. Application of future TerraSAR data for improvement of forest resource assessments. In: **Proceedings of the Forest-SAT 2002 Conference on Operational Tools in Forestry using Remote Sensing Techniques, August. 2002.** p. 5-9, .2002.

LIMA, A.R.; GIRARDI, E.P.; MANCIO, D.; COSTA, D.N. Impactos da Monocultura de Eucalypto sobre a Estrutura Agrárias nas Regiões Norte e Central do Espírito Santo. **Revista Nera**, v.34, p. 12-36, 2017.

LIMA, A.R.; GIRARDI, E.P.; MANCIO, D.; NUNES, D.C. Impactos da monocultura de eucalypto sobre a estrutura agrária nas regiões norte e central do Espírito Santo. **Revista Nera**, Presidente Prudente, v.34, p.12-36, 2017.

LOBAO, M. S.; LUCIA, R. M.D.; MOREIRA, M.S.S.; GOMES, A. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalypto com diferentes densidades. **Revista Árvore**. Viçosa, v.28, p.889-894, 2004.

MACHADO, L.; CALEGARIO, N. Ajuste de modelos estocásticos lineares e não-lineares para a descrição do perfil longitudinal de árvores. *Revista Árvore*. Viçosa. v. 31, p.845-852, 2007.

MARCUSSI, A.; BUENO, C.; MIQUELONI, D.; ARRAES, C. Utilização de índices de vegetação para os sistemas de informação geográfica. **Caminhos de Geografia**,Uberlândia, v. 11, p.41-53, 2010.

MAYAKA, T. B.; EBA'A-ATYI, R.; MOMO, S. T. Construction of multispecies allometric equations: in there a statistical palliative for destructive tree sampling? *Journal of Tropical Forest Science*, vol. 29, p.282-297, 2017.

MEDEIROS, R.B.; PINTO, A.L.; MIGUEL, A.E.S. Influência do uso e manejo florestal dos hortos de eucalipto na qualidade das águas superficiais da bacia hidrográfica do Córrego Moeda, Três Lagoas. **Revista de Geografia**. Recife, v.34, p.186-200, 2017.

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

MIURA, N.; JONES, S.D. Characterizing forest ecological structure using pulse types and heights of airborne laser scanning. **Remote Sensing Environment**. New York, v. 114, p.1069-1076, 2010.

MORA, F.; ARRAIGADA, O. A classification proposal for coefficients of variation in *Eucalyptus* experiments involving survival, growth and wood quality variables. **Bragantia**, São Paulo, v. 75, p.263-267, 2016.

MULLER, D. M.; SALLES, T. T.; PCIULLO, D. S. C.; BRIGHENTI, A. M.; CASTRO, C. R. T. Equações de altura, volume e afilamento para eucalipto e acácia estabelecido em sistema silvipastoril. **Floresta**, Paraná, v. 44, p.473-484, 2014.

NICOLETTI, M. F.; CARVALHO, S. P. C.; BATISTA, J. L. F. (2012). Revisão Bibliográfica sobre Métodos Não-Destrutivo de Cubagem de Árvores em Pé visando à Determinação da Biomassa. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, São Paulo, v. 20, p.102-116, 2012.

ODUM, E.P. **Ecologia**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986. 434 p.

OLIVEIRA, L. T.; FERREIRA, M. Z.; CARVALHO, L. M. T.; FERRAZ FILHO, A.C.; OLIVEIRA, T.C.A.; SILVEIRA, E.M.O; ACERBI JUNIOR, F.W. Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, p. 692-700, 2014.

PAES, F. A. S. V.; LIMA, A. M. N.; HAKAMADA, R. E.; BARROS, N. F. Impacto do Manejo dos Resíduos da Coheita, do Preparo do solo e da Adubação na Produtividade de Eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 37, p.1081-1090, 2013.

PASHER, J.; KING, D.J. Multivariate forest structure modelling and mapping using high resolution airborne imagery and topographic information. **Remote Sensing Environment**. v. 114, p.1718–1732, 2010.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da Madeira de Algumas Espécies de Eucalipto Plantadas no Brasil. **Colombo: Embrapa Florestas**, 2000, v. 38, 113 p.

PÉREZ-CRUZADO, C.; MERINO, A.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. **Biomass Bioenergy**, New York, v. 35, p.2839–2851, 2011.

PONZONI, F.J.; PACHECO, L.R.F.; SANTOS, S.B.; FILHO, C.O.A. Caracterização espectro-temporal de dosséis de *Eucalyptus* spp. mediante dados radiométricos TM/Landsat 5. **Cerne**, v. 21, p.267–275, 2015.

PONZONI, F.J.; PACHECO, L.R.F.; SANTOS, S.B.; FILHO, C.O.F.A. Caracterização espectro-temporal de dosséis de Eucalyptus spp. mediante dados radiométricos TM/Landsat 5. **Cerne**, v.21, p.267–275, 2015.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento Remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos: Parêntese, 2007. 144p.

QI J.; CHEHBONI, A.; HUETE, A.R.; KERR, Y.H. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI). **Remote Sensing Environment**, Utah, v. 48, p. 119-126, 1994.

RAMOS, J.H.; POSADAS; H. M. S.; LAZALDE, J. R. V.; URIS, J. C. T.; PÉREZ, G. A.; RAMOS, A. H.; LOPEZ, B. M.; PEDUZZI, A. Estimación del volumen comercial en plantaciones de Eucalyptus urophylla con modelos de volumen total y de razon. **Agrociencia**, v. 51, p.561-581, 2017.

RE, D. S.; ENGEL, V. L.; OTA, L. M.; JORGE, L. A. B. Tree Allometric equations in mixed forest plantations for the restoration of seasonal semideciduous forest. **Cerne**, Viçosa, v. 21, 2015.

REEVES, M.C.; WINSLOW, J.C.; RUNNING, S.W. Mapping weekly rangeland vegetation productivity using MODIS algorithms. **Journal of Range Management**, v.54, p.90-105, 2001.

REIS, A. R., CARVALHO, M. C., MELLO, J. M., GOMIDE, L. R., FILHO, A. C. F., JUNIOR, F. W. A. 2018. Spatial prediction of basal area and volume in Eucalyptus stands using Landsat TM data: an assessment of prediction methods. **New Zealand Journal of Forestry Science**. New Zeland, v.48, p.2-17, 2018.

RIBEIRO, M. D. B., BLANCO, JORGE, L. A. B., MISCHAN, M. M., SANTOS, A. L., BALLARIN, A. W. Evaluation of biomass production of the main stem of a hybrid eucalyptus clone under different spacings. **Ciencia Florestal**, Santa Maria, v. 27, p. 31-45, 2017.

ROSEMBACK, R.; FRANÇA, A. M. S.; FLOREZANO, T. G. Análise Comparativa dos dados NDVI obtidos de imagens CCD/CBERS-2 e TM/LANDSAT-5 em área urbana. INPE. **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiania, p. 1075-1082, 2005.

ROUSE, J.W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: **ERTSSYMPOSIUM**. Washington, v.3, p.309-317, 1973.

RYAN, M.G.; HARMON, M.E; BIRDSEY, R.A.; GIARDINA, C.P; HEATH, H.L; HOUGHTON, R. A.; JACKSON, R. B; MCLINLEY, D. C.; MORRISON, J. F.; MURRAY, B. C.; PATAKI, D. E., SKOG, K. E. 2010. A synthesis of the Science on forest and carbon for U.S. forests. **Issues Ecology**, v.13, p.1–16, 2010.

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

SANQUETTA, C.R. Métodos de determinação de biomassa florestal. **As florestas e o carbono**. Curitiba, p.119-140, 2002.

SANQUETTA, C.R.; DALLA CORTE, A.P.; BEHLING, A.; PIVA, I.R.O. **Atualidades em Mensuração Florestal**. UFPR. p.398-402, 2014.

SANTOS, A. C. A.; SILVA, S.; LEITE, H. G.; CRUZ, J. P. Influence of soil and climate variability in the growth of eucalyptus clones in Bahia Northeast. **Pesquisa Florestal Brasileira**. v. 37, p.259-268, 2017.

SANTOS, A.; SILVA, S.; LEITE, H.; CRUZ, J. Influência da variabilidade edafoclimática no crescimento de clones de eucalipto no Nordeste baiano. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.37, p. 259-268, 2017.

SANTOS, J. R. S.; FREITAS, C.C.; ARAUJO, L.S.; DUTRA, L.V.; MURA, J.C.; GAMA, F.F.; SOLER, L.S.; SANT'ANNA, S.J.S. Airborne P-band SAR applied to the aboveground biomass studies in the Brazilian tropical rainforest. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 87, p. 482-493, 2003.

SARMENTO, J. L. R.; REGAZZI, A. J.; SOUSA, W. D.; TORRES, R. D. A., BREDA, F. C.; MENEZES, G. D. O. Estudo da curva de crescimento de ovinos Santa Inês. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.35, p.435-442, 2006.

SMITH, D. M. 1954. Maximum Moisture Content Method for Determining Specific Gravity of Small Wood Samples. U.S. **Forest Products Laboratory Report**, nº 2014, 8 p.

SCHMIT, R.,; MORA, F.; EMHART, V. I; RUBILAR, R. Longitudinal analysis in the selection of Eucalyptus globulus clones under contrasting water availability conditions. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 43, p.217-224, 2015.

SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 33, p.1133-1139, 2009.

SILVA, O. M.; DIAS, J. M. N. EVALUATION OF TECHNOLOGICAL INTENSITY OF EXPORTS IN THE FORESTRY SECTOR. **Revista Árvore**, Viçosa, v.40, p.297-305, 2016.

SILVEIRA, P.; KOEHLER, H.S.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E. O estado da arte na estimativa de biomassa e carbono em formações florestais. **Floresta**, Curitiba, v.38, p.185-206, 2008.

SOUZA, F. C.; REIS, M. G. F.; LEITE, H. G.; FARIA, R. S.; CALIMAN, J. P.; BARBOSA, R. A.; OLIVEIRA, C. H. R. Growth of intact plants and coppice in short rotation eucalypt plantations. **New Forests**, United States, v. 47, p.195-208, 2016.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa, 2006. 276p.



TIMOTHY, D; ONISIMO, M.; CLETAH, S.; SAMUEL, A.; BANGIRA, T. Remote sensing aboveground forest biomass: A review. **Tropical Ecology**. Varanasi, v. 57, p. 125-132, 2016.

TONINI, H.; ALVES BORGES, R. Equação de volume para espécies comerciais em Floresta Ombrófila Densa no sul de Roraima. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Brasília, v. 35, p.111-118, 2015.

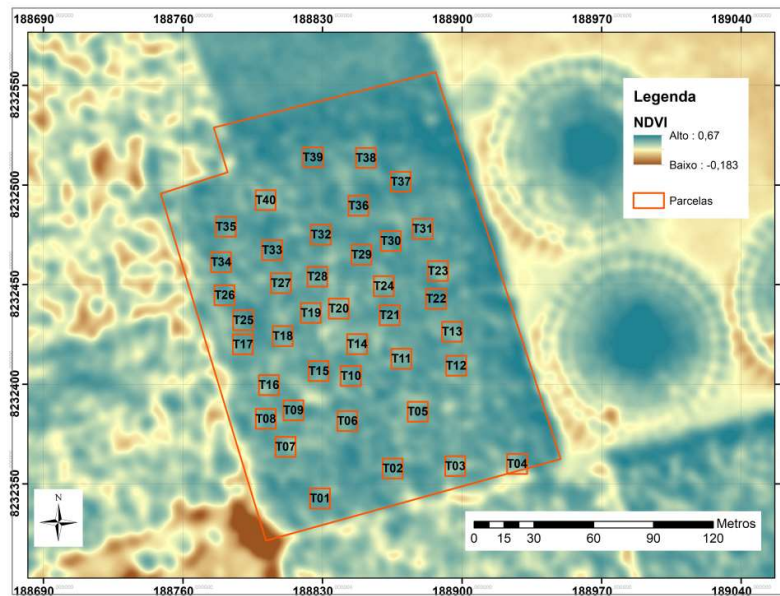
TRILLERAS, A. B.; AGUIRRE, A. M. L.; RODRIGUEZ, V. M. N. Predicting merchantable volumes of *Eucalyptus grandis* through total volume and volume-ratio models. **Colombia Forestal**, Colombia, v. 17, p. 137-149, 2014.

WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II**. v. 28, n. 1, p. 120, 2003. Tese doutorado.

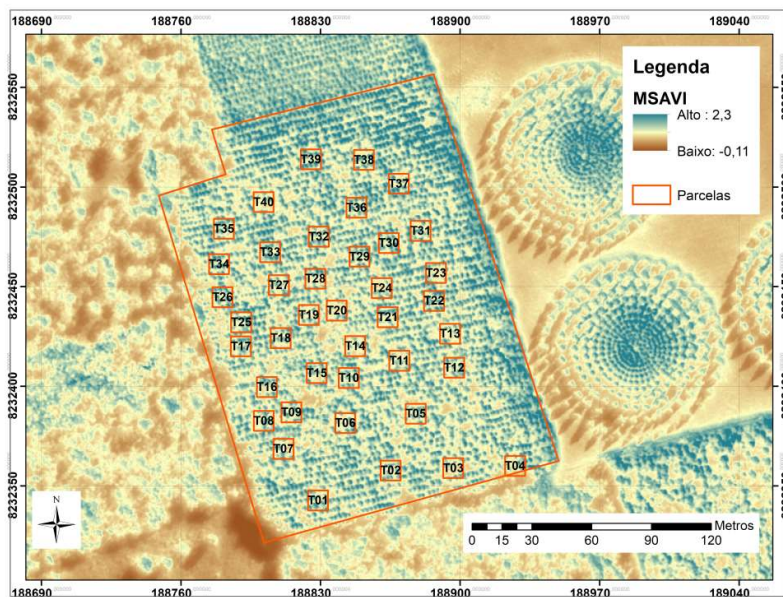
WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucaria utilizando imagens do satélite IKONOS II. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, p. 169-181, 2009.

ZIEMMER, J. K.; BEHLING, A.; CORTE, A. P. D. Quantificação da biomassa e dos teores de carbono de pteridófitas arbóreas em floresta ombrófila mista. **BIOFIX Scientific Journal**, Paraná, v. 1, p.60-73, 2016.

## 8. ANEXOS



**Figura 7.** Cena obtida a partir de cálculo do índice de vegetação NDVI.



**Figura 8.** Cena obtida a partir de cálculo do índice de vegetação MSAVI.