



Alan Mario Zuffo

Organizador



**Avanços
nas Ciências
Florestais
Volume III**



Pantanal Editora

2022

Alan Mario Zuffo
Organizador

Avanços nas Ciências Florestais
Volume III



Pantanal Editora

2022

Copyright© Pantanal Editora

Editor Chefe: Prof. Dr. Alan Mario Zuffo

Editores Executivos: Prof. Dr. Jorge González Aguilera e Prof. Dr. Bruno Rodrigues de Oliveira

Diagramação: A editora. **Diagramação e Arte:** A editora. **Imagens de capa e contracapa:** Canva.com. **Revisão:** O(s) autor(es), organizador(es) e a editora.

Conselho Editorial

Grau acadêmico e Nome

Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos
Prof. MSc. Adriana Flávia Neu
Prof. Dra. Allys Ferrer Dubois
Prof. Dr. Antonio Gasparetto Júnior
Prof. MSc. Aris Verdecia Peña
Prof. Arisleidis Chapman Verdecia
Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva
Prof. Dr. Bruno Gomes de Araújo
Prof. Dr. Caio Cesar Enside de Abreu
Prof. Dr. Carlos Nick
Prof. Dr. Claudio Silveira Maia
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos
Prof. Dr. Cristiano Pereira da Silva
Prof. Ma. Dayse Rodrigues dos Santos
Prof. MSc. David Chacon Alvarez
Prof. Dr. Denis Silva Nogueira
Prof. Dra. Denise Silva Nogueira
Prof. Dra. Dennyura Oliveira Galvão
Prof. Dr. Elias Rocha Gonçalves
Prof. Me. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Fábio Steiner
Prof. Dr. Fabiano dos Santos Souza
Prof. Dr. Gabriel Andres Tafur Gomez
Prof. Dr. Hebert Hernán Soto Gonzáles
Prof. Dr. Hudson do Vale de Oliveira
Prof. MSc. Javier Revilla Armesto
Prof. MSc. João Camilo Sevilla
Prof. Dr. José Luis Soto Gonzales
Prof. Dr. Julio Cezar Uzinski
Prof. MSc. Lucas R. Oliveira
Prof. Dra. Keyla Christina Almeida Portela
Prof. Dr. Leandro Argentel-Martínez
Prof. MSc. Lidiene Jaqueline de Souza Costa Marchesan
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann
Prof. MSc. Marcos Pisarski Júnior
Prof. Dr. Marcos Pereira dos Santos
Prof. Dr. Mario Rodrigo Esparza Mantilla
Prof. MSc. Mary Jose Almeida Pereira
Prof. MSc. Núbia Flávia Oliveira Mendes
Prof. MSc. Nila Luciana Vilhena Madureira
Prof. Dra. Patrícia Maurer
Prof. Dra. Queila Pahim da Silva
Prof. Dr. Rafael Chapman Auty
Prof. Dr. Rafael Felipe Ratke
Prof. Dr. Raphael Reis da Silva
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes
Prof. Dr. Ricardo Alves de Araújo (*In Memoriam*)
Prof. Dra. Sylvana Karla da Silva de Lemos Santos
MSc. Tayronne de Almeida Rodrigues
Prof. Dr. Wéverson Lima Fonseca
Prof. MSc. Wesclen Vilar Nogueira
Prof. Dra. Yilan Fung Boix
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Instituição

OAB/PB
Mun. Faxinal Soturno e Tupanciretã
UO (Cuba)
IF SUDESTE MG
Facultad de Medicina (Cuba)
ISCM (Cuba)
UFESSPA
UEA
UNEMAT
UFV
AJES
UFGD
UEMS
IFPA
UNICENTRO
IFMT
UFMG
URCA
ISEPAM-FAETEC
IFG
UEMS
UFF
(Colômbia)
UNAM (Peru)
IFRR
UCG (México)
Mun. Rio de Janeiro
UNMSM (Peru)
UFMT
Mun. de Chap. do Sul
IFPR
Tec-NM (México)
Consultório em Santa Maria
UFJF
UEG
FAQ
UNAM (Peru)
SEDUC/PA
IFB
IFPA
UNIPAMPA
IFB
UO (Cuba)
UFMS
UFPI
UFG
UEMA
IFB
UFPI
FURG
UO (Cuba)
UFT

Apresentação

O avanço tecnológico é comum em todas as áreas de conhecimento, na área de Ciência Florestal não é diferente. As tecnologias florestais são fundamentais para o uso sustentável dos recursos naturais e na comercialização dos produtos florestais. A obra, vem a consolidar o anseio da Editora Pantanal na divulgação de resultados, que contribuem de modo direto no desenvolvimento humano e na sustentabilidade dos recursos naturais.

O primeiro volume do e-book “Avanços nas Ciências Florestais III” é a continuação de uma série de volumes de e-books com trabalhos que visam otimizar a produção e conservação dos recursos florestais. Nos capítulos são abordados os seguintes temas: importância do sistema radicular de árvores em plantios florestais; fisiologia do estresse hídrico em plantas; modelagem volumétrica de um plantio e candeia a partir de imagens RapidEye; escarificação química e mecânica de sementes de *Parkinsonia aculeata* L. e seu efeito na absorção de água e germinação. Portanto, esses conhecimentos irão agregar muito aos seus leitores que procuram promover melhorias quantitativas e qualitativas na Ciência Florestal. Sempre em busca da sustentabilidade do planeta.

Aos autores dos capítulos, pela dedicação e esforços sem limites, que viabilizaram esta obra que retrata os recentes avanços científicos e tecnológicos na área de Avanços nas Ciências Florestais III os agradecimentos do organizador e da Pantanal Editora. Por fim, esperamos que este ebook possa colaborar e instigar mais estudantes e pesquisadores na constante busca de novas tecnologias e avanços para a áreas de Ciência Florestal. Assim, garantir uma difusão de conhecimento fácil, rápido para a sociedade.

O organizador


Sumário

Apresentação	4
Capítulo 1	6
Importância do sistema radicular de árvores em plantios florestais	6
Capítulo 2	17
Fisiologia do Estresse Hídrico em Plantas	17
Capítulo 3	24
Modelagem volumétrica de um plantio de candeia a partir de imagens RapidEye	24
Capítulo 4	40
Escarificación química y mecánica de semillas Parkinsonia aculeata L. SP.Pl. y su efecto en la absorción de agua y germinación	40
Índice Remissivo	50
Sobre o organizador	51


Modelagem volumétrica de um plantio de candeia a partir de imagens RapidEye

Recebido em: 16/10/2022

Aceito em: 17/10/2022


 10.46420/9786581460655cap3

João Paulo Simões Branquinho¹ 

Mônica Canaan Carvalho² 

Thiza Falqueto Altoé³ 

Luciano Cavalcante de Jesus França^{*4} 

Fausto Weimar Acerbi Júnior⁵ 

INTRODUÇÃO

A candeia – *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish – é uma espécie florestal típica de áreas de elevada altitude (acima de 900 m), com ocorrência entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado (Loeuille, 2015). Sua madeira possui um óleo essencial que lhe confere múltiplos usos como a produção de moirões e lenha devido à sua alta durabilidade e inflamabilidade. Seu óleo essencial que tem como principal princípio ativo o alfa-bisabolol (Santos et al., 2019), é muito utilizado pelas indústrias de cosméticos e de medicamentos devido suas propriedades antiflogísticas, antibacterianas, dermatológicas e espasmódicas (Scolforo et al., 2016), aumentando assim a procura por essa espécie.

No entanto, as espécies arbóreas de *Eremanthus erythropappus* são exploradas há décadas para diversos fins comerciais, como a produção de madeira para extração química e carvão (Pádua et al., 2016). A extração da madeira e do óleo da Candeia ainda se concentra na exploração de populações nativas, denominadas candeais (Clark et al., 2011; Donadelli, 2012), sem que haja uma preocupação com o plantio de novas áreas. Esses novos plantios vêm sendo recomendado por diversos autores nos últimos anos (Silva et al., 2014; Scolforo et al., 2016a, 2016b), que também destacam a carência de dados e, portanto, a necessidade do desenvolvimento de modelos de crescimento e produção para a espécie *Eremanthus erythropappus*.

O uso de modelos matemáticos na estimativa do volume de uma floresta serve como base e critério para o manejo sustentável. Modelos volumétricos tradicionais empregam como variáveis independentes exclusivamente as variáveis obtidas em campo, como diâmetro e altura. Contudo, essas medições em campo demandam muitos recursos principalmente em grandes áreas ou áreas distantes e pouco acessíveis, o que leva a um aumento considerável dos custos (Alves et al., 2013). Como forma de minimizar esses custos sem perda de precisão nas estimativas da produção florestal, as técnicas de

^{1,2,3,5} Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal de Lavras – UFLA.

⁴ Instituto de Ciências Agrárias – ICIAG, Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

* Autor(a) correspondente: luciano.franca@ufu.br

processamento e extração de dados de imagens de sensoriamento remoto (SR), como os índices de vegetação, vêm sendo cada vez mais aplicadas na estimativa volumétrica de uma determinada área (Oliveira et al., 2014; Barros et al., 2015; Reis et al., 2018a; Reis et al., 2018b; Reis et al., 2018c).

Desta forma, para a espécie *Eremanthus erythropappus* ainda não existem estudos voltados a esse tema, gerando significativas lacunas no entendimento de quais variáveis ou índices espectrais podem auxiliar na estimativa e espacialização do volume. Assim, esse estudo teve como objetivo desenvolver um modelo matemático, integrando dados espectrais aos dados de campo para estimar o volume de um plantio de *Eremanthus erythropappus*, bem como espacializar essa informação para toda a área de estudo.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área do estudo

A área de estudo é um plantio experimental de Candeia com 2,49 ha, plantado em 2004 no município de São João da Mata, sul do estado de Minas Gerais, nas coordenadas 21° 58' 59" S e 45° 58' 11" O (Figura 1). A região possui clima Tropical de Altitude, do tipo Cwa de Köppen, com elevação aproximada de 1.350 m, temperaturas moderadas e verões quentes e chuvosos, apresentando temperatura média anual de 23°C e precipitação média anual de 1.605 mm.

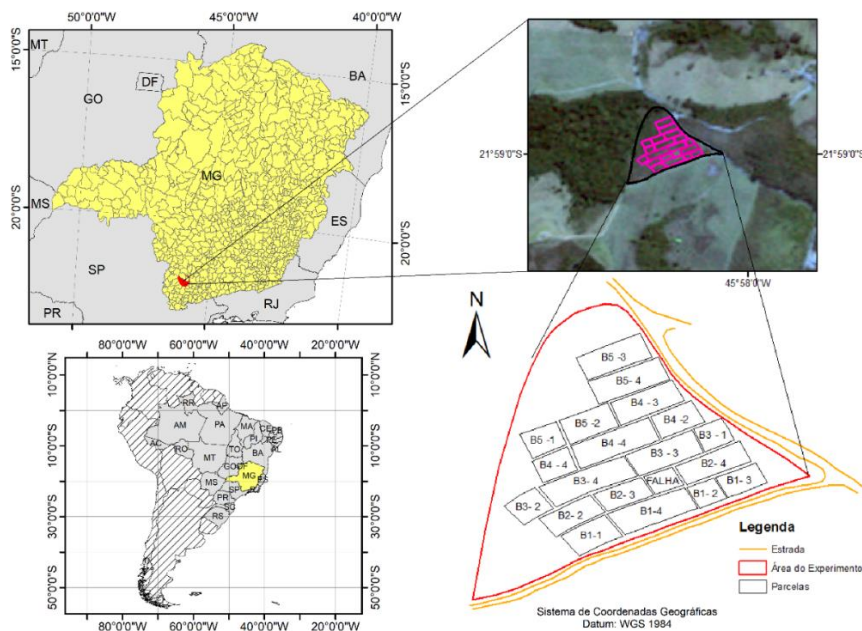


Figura 1. Localização do experimento em São João da Mata (MG), com a distribuição espacial das parcelas. Fonte: os autores.

O experimento consiste em quatro tratamentos com diferentes espaçamentos: Tratamento 1 = Espaçamento (2,0 x 1,0 m); Tratamento 2 = Espaçamento (2,0 x 1,5 m); Tratamento 3 = Espaçamento (2,0 x 2,0 m) e; Tratamento 4 = Espaçamento (2,0 x 2,5 m), onde cada tratamento repete-se cinco vezes (cinco blocos) (Figura 2). Destaca-se que, ao longo do experimento foram tomados os cuidados

necessários para o bom desenvolvimento das árvores com a eliminação da mato-competição.



Figura 2. Imagem da área de experimento com distribuição das parcelas e amostras. Fonte: os autores

Na região central do experimento, existe uma falha de plantio ocasionando a exclusão da parcela B2-1 na amostragem, devido à pouca quantidade de árvore nesta parcela, logo serão utilizadas 19 das 20 parcelas. As parcelas possuem um tamanho médio de 864m², as amostras contendo 4 pixels foram coletadas em regiões centrais das parcelas ou áreas livres de clareiras ou falhas, para maior qualidade da amostragem.

Estimativa do volume de madeira na área de experimento

Foi realizado um censo na área do experimento em 2014 onde a circunferência a 1,30 m do solo (CAP) de cada indivíduo dentro da parcela foi mensurada. Em seguida, os valores de CAP foram transformados em diâmetro equivalente (DAPEq), utilizando-se a Equação 1. O DAPEq indica o diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) que produziria a mesma área seccional que o somatório das áreas seccionais dos vários fustes existentes na árvore bifurcada.

$$DAPEq = \sqrt{\frac{(CAP1^2 + CAP2^2 + \dots + CAPn^2)}{\pi}} \quad (\text{Eq.1})$$

Em que: DAPEq representa o diâmetro que produz a mesma área seccional que o somatório dos vários fustes; CAP_n representa a circunferência medida a 1,30m do solo do i-ésimo fuste; π é uma constante dada pela relação entre o perímetro de uma circunferência e seu diâmetro.

A altura total dos indivíduos foi obtida com uso de vara telescópica graduada em centímetros (cm). Para o caso das árvores bifurcadas, foi atribuída como valor único de altura para aquele indivíduo sua altura máxima entre todos os fustes que tiveram seus diâmetros mensurados naquela árvore.

No cálculo do volume total de cada árvore foi utilizado a Equação 2 proposta por Scolforo (2008), para estimativa do volume de árvores de candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish) com casca para a região de Aiuruoca (MG), esta equação possui bons valores de R² ajustado e Syx, respectivamente de 98,18% e 21,93%. A equação utilizada é apresentada a seguir:

$$\ln(VT) = -10,069537 + 1,010656 * \ln(DAP^2 * HT) \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que: DAP é o diâmetro medido a 1,30m do solo; HT é a altura total da árvore; Ln é logaritmo neperiano.

Após realizado o cálculo do volume individual foi calculado o volume total de cada parcela e, posteriormente, extrapolado para (m³/ha). As falhas encontradas na área como árvores doentes, quedas, foram notificadas e retiradas no cálculo de volume das parcelas.

Cálculo dos índices de vegetação

Foram calculados 6 (seis) Índices de Vegetação (IV) com base nas reflectâncias das bandas individuais das imagens RapidEye. A imagem foi adquirida no banco de dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA) através da Universidade Federal de Lavras (UFLA), disponibilizadas com as devidas correções geométricas e radiométricas, já as correções atmosféricas foram realizadas no módulo FLAASH (ENVI 5.1).

A imagem foi adquirida em 3 de agosto de 2014 (data próxima à realização do censo), com resolução espacial de 5m e resolução espectral de 5 bandas, sendo Banda 1 – Azul (440-510nm); Banda 2 – Verde (520-590nm); Banda 3 – Vermelho (630-685nm); Banda 4 – RedEdge (690-730nm) e Banda 5 – Infravermelho Próximo (760-850nm).

A Tabela 1 apresenta os índices utilizados como variáveis independentes na modelagem. A escolha de cada índice baseou-se na literatura, selecionando aqueles que apresentaram bons resultados nas estimativas de volumes, facilitando assim a comparação com outros estudos (Lu, 2004; Reis et al., 2018).

Tabela 1. Índices de Vegetação (IV) utilizados na caracterização espectral do plantio de candeia. Fonte: os autores.

IV	Fórmula	Referência
NDVI	$NDVI = \frac{\rho Nir - \rho Red}{\rho Nir + \rho Red}$	Rouse et al. (1973)
ND54	$ND54 = \frac{\rho Nir - \rho 4}{\rho Nir + \rho 4}$	Huete (2002)
ND43	$ND43 = \frac{\rho 4 - \rho Red}{\rho 4 + \rho Red}$	Huete (2002)
RVI	$RVI = \frac{\rho Nir}{\rho Red}$	Jordan (1969)
SAVI	$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho Nir - \rho Red)}{(L + \rho Nir + \rho Red)}$	Huete et al. (1988)
EVI	$EVI = 2,5 \left(\frac{\rho Nir - \rho Red}{\rho Nir + 6 * \rho Red - 7,5 * \rho Blue + 1} \right)$	Huete et al. (1998)

Em que: ND = *Normalized Difference*; NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*; SAVI = *Soil-Adjusted Vegetation Index* (L= 0,5); EVI = *Enhanced Vegetation Index*; RVI = *Relative Vegetation Index*.

Análise exploratória dos dados

Baseado nos valores dos 4 pixels que compõem a amostra de cada parcela do experimento foram calculados seis índices de vegetação (NDVI; ND54; ND43; RVI; SAVI; EVI). A partir destes valores foi possível extrair medidas de posição e dispersão destes índices (Média; Valores máximo e mínimo; Amplitude; Desvio Padrão) bem como das bandas B3, B4 e B5, em relação a parcela estudada. As medidas de dispersão e posição das variáveis de SR foram extraídas no *software* ArcGis10.3 (ESRI) e integradas aos dados de volume (m³) por parcela.

As médias das bandas e dos de índices de vegetação encontradas em todas as parcelas foram posteriormente utilizadas para o cálculo da correlação linear com o volume matriz de correlação, com o intuito de facilitar o entendimento das correlações, realizaram-se a plotagem de gráficos de dispersão e frequência entre as variáveis dendrométricas e as variáveis espectrais.

Processo de modelagem

Para a modelagem do volume (m³/ha) empregou-se a regressão linear múltipla com o método de eliminação de variáveis Stepwise em conjunto com o Critério de Seleção de Akaike (AIC), onde foram selecionadas somente os índices de vegetação e bandas da imagem Rapideye que mais contribuíram para explicar o comportamento da variável dependente volume. O método de eliminação Stepwise foi do tipo Forward, executado no programa estatístico RStudio (R Core Team, 2017). Esse procedimento (Forward) parte da suposição de que não há variável no modelo, apenas o intercepto. A ideia do método é adicionar

uma variável de cada vez, onde a primeira variável selecionada é aquela com maior correlação com a resposta.

Foi calculada a estatística F nas variáveis independentes para testar sua significância no modelo. As variáveis que entram no modelo possuem a estatística F maior do que o ponto crítico, chamado de F inicial. O processo é repetido, ou seja, a variável com maior correlação parcial com volume (m^3/ha) é adicionada no modelo se sua estatística F parcial for maior que F inicial, até que não seja incluída mais nenhuma variável explicativa no modelo.

Outro método possível de geração de modelos e através da técnica Backward, porém este método se mostrou, neste experimento, ineficaz já que o número de amostras reduzido gerou resíduos muito altos, impossibilitando a incorporação das variáveis e montagem do modelo inicial. Foi realizado o teste de VIF (Montgomery et al., 2006) para avaliar a existência de multicolinearidade e eliminação das variáveis inflacionadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da correlação entre índices de vegetação e volume

Em geral as bandas isoladas não apresentaram boa correlação com volume (Quadro 1), já que elas estão vulneráveis a interferências e distorções e acabam não acompanhando bem o perfil do plantio ou floresta, assim os índices de vegetação servem como moderadores e atenuam as variações nas refletâncias ocorridas.

Os índices de vegetação normalizados apresentaram alta correlação com volume a qual é justificada em função de sua composição utilizar-se às bandas espectrais na região do espectro eletromagnético do vermelho ao infravermelho próximo, sendo respectivamente uma região de forte absorção e de máxima reflectância (Watzlawick, 2003). Os volumes nas parcelas variaram bastante, tendo um coeficiente de variação (CV) de 33,13% valor justificado devido as características do plantio com materiais genéticos diferentes, padrão de crescimento da espécie e disponibilidade de nutrientes no solo.

Quadro 1. Coeficiente de correlação linear de Pearson (r) entre o volume de madeira (m^3/ha) de um plantio de candeia e os valores de reflectância das bandas e índices de vegetação. Fonte: os autores.

NDVI	Corr. (r)	ND54	Corr. (r)	Banda 5	Corr. (r)
Médio	0,6843	Médio	0,6294	Médio	0,1555
Mínimo	0,5688	Mínimo	0,4722	Mínimo	-0,2271
Máximo	0,6791	Máximo	0,5529	Máximo	0,1696
Amplitude	-0,0981	Amplitude	-0,0435	Amplitude	0,4148
Desvio padrão	-0,2100	Desvio padrão	-0,0119	Desvio padrão	0,2674

ND43	Corr. (r)	RVI	Corr. (r)	Banda 4	Corr. (r)
Médio	0,7306	Médio	0,7212	Médio	-0,5680
Mínimo	0,6275	Mínimo	0,6003	Mínimo	-0,5770
Máximo	0,5204	Máximo	0,7100	Máximo	-0,4749
Amplitude	-0,1584	Amplitude	-0,1800	Amplitude	-0,1327
Desvio padrão	-0,2372	Desvio padrão	0,1139	Desvio padrão	-0,2189
SAVI	Corr. (r)	EVI	Corr. (r)	Banda 3	Corr. (r)
Médio	0,6843	Médio	0,6461	Médio	-0,6633
Mínimo	0,5688	Mínimo	0,4525	Mínimo	-0,5073
Máximo	0,6791	Máximo	0,6208	Máximo	-0,4271
Amplitude	-0,0981	Amplitude	0,0983	Amplitude	-0,2393
Desvio padrão	-0,2100	Desvio padrão	-0,0228	Desvio padrão	-0,3180

Em geral os valores médios dos índices de vegetação e das bandas foram os que se correlacionaram melhor com o volume, já que representam a variabilidade espacial dos pixels presentes na amostra, sendo o ND43 médio ($r = 0,73$) e RVI médio ($r = 0,72$) com maiores correlações, já o desvio padrão se mostrou com baixos valores onde Banda 3 ($r = -0,31$) e ND43 ($r = -0,23$).

A banda 5 foi a única a obter valores positivos de correlação, já que sua faixa de comprimento de onda apresenta altas taxas de reflectância para a vegetação e acabam por captar melhor as variações ao longo da área de plantio. Em estudo realizado por Alba (2016), ao analisar as bandas espectrais em um plantio adulto de eucalipto, observou-se que a banda do infravermelho foi a que melhor se correlacionou com a variável florestal volume, apresentando r no valor de 0,6802.

Tendo como base esses resultados, foi realizado um gráfico (Figura 3) apenas com os valores médios de cada índice que apresentaram forte correlação com o volume ou fizeram parte do modelo final. O NDVI apresentou alta correlação com volume, no trabalho de Berra et al. (2012) foi encontrado o valor de correlação de 0,79 entre NDVI e volume de eucalipto. O SAVI apresentou boa correlação $r = 0,68$, resultado semelhante ao trabalho de Alba (2016) onde a variável florestal em plantio de eucalipto adulto apresentou um coeficiente (r) no índice SAVI de 0,7063.

Fernandes et al. (2011), utilizando imagens AVNIR-2 do sensor ALOS para estimar parâmetros biofísicos em plantações de eucaliptos, encontraram correlações positivas entre o volume de madeira com NDVI ($r=0,15$) e com RVI ($r=0,16$). Os valores embora menores que os encontrados neste trabalho reforçam uma correlação positiva entre as variáveis.

O ND54 apresentou boa correlação $r = 0,63$, porém menor valor em relação aos outros índices normalizados, resultado justificado pelo fato da utilização da banda RedEdge no lugar da banda (3)

vermelha, onde a RedEdge por ser uma banda de transição entre a alta absorção e alta reflectância, tornou o índice pouco sensível a captação das variações do perfil do dossel.

O ND43 apresentou a maior correlação 0,73 se comparado a outros índices normalizados, o perfil do plantio com alto volume de folhas e presença de flores possibilitou uma alta variação na reflectância dentro da faixa da banda RedEdge. Segundo Gitelson (2005) a banda RedEdge é mais sensível as variações no teor de clorofila captando melhor a reflectância e transmitância, possibilitando que árvores de maior volume que apresentam copa mais densas sejam diferenciadas das com menor volume.

O EVI apresentou boa correlação $r = 0,65$ com volume, valor já esperado por ser um índice que minimiza os efeitos de resposta do solo e atmosfera, como também apresenta alta resposta a variações fenológicas. O EVI é muito utilizado no estudo das variações de perfil e densidade de vegetação (Huete et al. 2002). Segundo Justice et al. (1998) o EVI também é utilizado na avaliação do vigor da vegetação, pois está diretamente relacionado com variações ocorridas na cobertura verde.

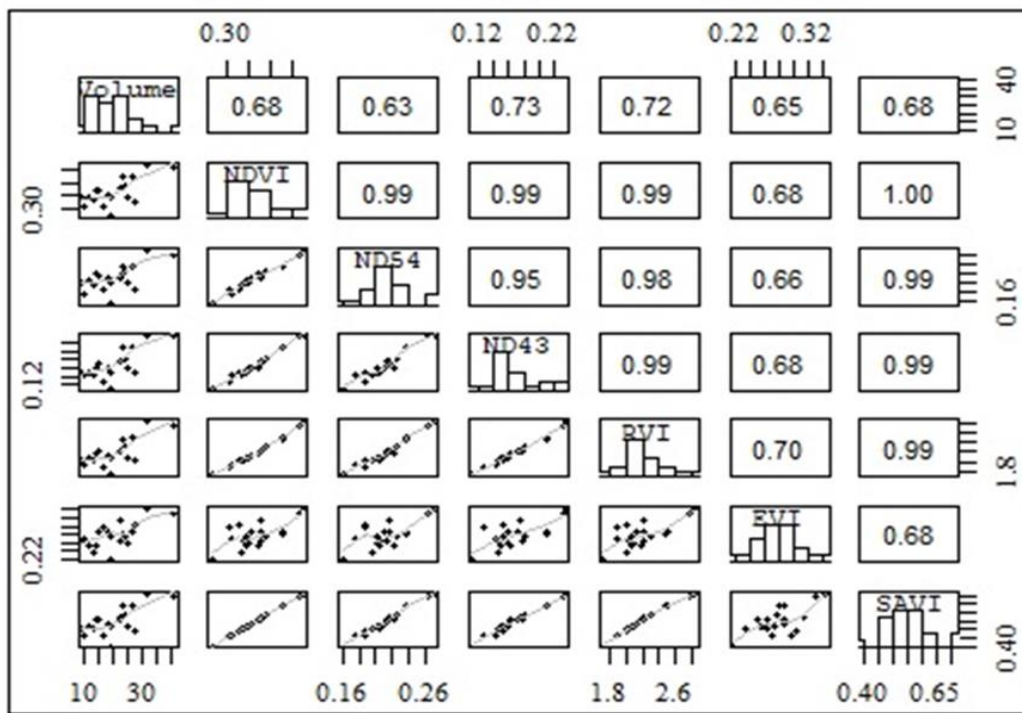


Figura 3. Matriz com o histograma de frequência (na diagonal), gráficos de dispersão e valor de correlação entre as variáveis volume(m³/ha) e índices de vegetação. Fonte: os autores.

Ajuste de modelo pelo método Stepwise Forward

O método *Stepwise* foi eficiente para alcançar os objetivos propostos no trabalho. Em seu trabalho Rosot (1989) ressaltou que quando todas as variáveis, inclusive aquelas de baixa correlação linear simples com a variável dependente, foram usadas no procedimento *Stepwise* foram obtidas as melhores equações no que se refere aos indicadores de ajuste e precisão.

Tabela 3. Valores de saída e AIC para método *Stepwise Forward* até montagem do modelo final. Fonte: os autores.

Modelo	Start/Step	Variável	AIC
Volume $\sim \beta_0$	79,41	ND43	66,92
Volume $\sim \beta_0 + \text{ND43}$	66,92	SAVI	65,97
Volume $\sim \beta_0 + \text{ND43} + \text{SAVI}$	65,97	ND54	63,72
Volume $\sim \beta_0 + \text{ND43} + \text{SAVI} + \text{ND54}$	63,73	Modelo Final	x

Na Tabela 3 ilustra-se o processo regressão linear múltipla via *stepwise* onde o modelo inicia-se apenas com B_0 e um valor inicial de AIC. Após o programa ter realizado regressões com todas as variáveis independentes o ND43 apresentou menor AIC dentre as variáveis candidatas escolhidas pelo *stepwise* para compor o B_1 , após uma nova regressão com todas as variáveis restantes o SAVI apresentou menor AIC para compor B_2 até que após a inclusão do ND54 não houve mais variáveis significativas.

Foram realizados testes de multicolinearidade através da técnica VIF após a montagem do modelo final, o valor de referência adotado foi $VIF < 10$, um valor muito utilizado em trabalhos e comprovadamente seguro para eliminar os efeitos de multicolinearidade. Os valores obtidos após os testes encontram-se na Tabela 4.

Os valores do modelo inicial estão bem acima do valor referência, isso é bem comum quando se usa apenas índices de vegetação como variáveis, já que todos os índices são compostos pelas mesmas bandas e acabam tendo alta correlação entre si.

Tabela 4. Modelo inicial selecionado através do método *Stepwise Forward* e final após teste VIF. Fonte: os autores.

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	$R^2_{aj.}$	Syx%
Parâmetro	64,35	2229,64	-1539,14	1952,3	0,6168	25,54
Variável	--	ND43 méd	SAVI méd	ND54 méd	--	--
VIF	--	719,5762	2519,2619	594,6932	--	--
Parâmetro	7,907	331,976	-203,335*	--	0,5292	28,3
Variável	--	ND43 méd	ND54 méd	--	--	--
VIF	--	10,7905	10,7905	--	--	--
Parâmetro	-8,174	171,509	--	--	0,5064	29,03
Variável	--	ND43 méd	--	--	--	--

Em que: $V = m^3/ha$; SAVI=Soil-Adjusted Vegetation Index ($L = 0,5$); ND54.Normalized Difference B4-B5; ND43 Normalized Difference B4-B3. (valores médios dos índices). * ND54 não foi estatisticamente significativo.

O modelo inicial apresentou alta multicolinearidade, a retirada das variáveis que estavam inflacionando o modelo ajudou a diminuir este efeito. Após cada teste com VIF foi sendo realizada a remoção das variáveis com maiores valores de multicolinearidade resultando em apenas uma variável. A equação 3 apresenta o modelo final:

$$V \left(\frac{m^3}{ha} \right) = -8,174 + 171,509 * ND43médio \quad (Eq.3)$$

O modelo final representado pela equação (3) apresentou valores R^2_{aj} (%) de 50,64 e $Syx\%$ 29,03 mostrando baixa capacidade das variáveis IV em estimar o volume. Isso pode ser explicado devido a pequena área de estudo e ao plantio com perfil heterogêneo, apresentando ampla variação do volume entre as parcelas. A grande variabilidade de material genético (sem melhoramento, via semente) e a variação no espaçamento do plantio aproximou os valores encontrados de R^2_{aj} e Syx a trabalhos com uso de índices de vegetação para modelagem volumétrica de florestas tropicais. No trabalho de Machado et al. (2017) com fragmentos de florestas tropicais, foram encontrados valores de R^2_{aj} entre 0,16 e 0,45 e Syx (%) entre 8 e 15%. No trabalho de Silva (2012) na estimativa de estoque de madeira em Cerrado *sensu strictu* com uso de índices de vegetação, encontrou em seu ajuste de modelo R^2 de 0,20 e um erro de 144,59%, sendo justificado pela alta heterogeneidade da área amostrada e árvores com alturas e diâmetros muito diferentes. Condições semelhantes encontradas na área de plantio utilizada neste trabalho.

Macedo et al. (2017) trabalhando com imagens de alta resolução espacial na estimativa de volume de eucalipto encontrou em seus modelos ajustados utilizando como variáveis NDVI; SAVI; SR e EVI valores de R^2_{aj} entre 0,53 a 0,70 mostrando que a homogeneidade nos plantios ajuda nas estimativas dos modelos ajustados.

Os valores de resíduos foram muitos altos, tanto para positivo quanto para negativo, variando entre -80% a 40%. Isso mostra que a variação nos índices de vegetação não captou bem a variação de volume devido a heterogeneidade na área de plantio, materiais genéticos distintos e utilização de diferentes espaçamentos de plantios (Figura 4 A-B).

No trabalho de Leal et al. (2013) na estimativa de volume de eucalipto utilizando imagens Rapideye encontrou padrões de resíduo entre -20% a 20% dispersos de forma semelhante, mostrando que a heterogeneidade nas parcelas com espaçamentos distintos e muita variação de volume elevam o erro.

O padrão de dispersão dos resíduos caracteriza uma heterocedasticidade, demonstrando que a variância não foi constante ao longo da variação do volume, fato que comprova que uma maior amostragem ou a inclusão de outras variáveis obtidas em campo é necessária para melhorar a capacidade de predição do modelo ajustado (Figura 4).

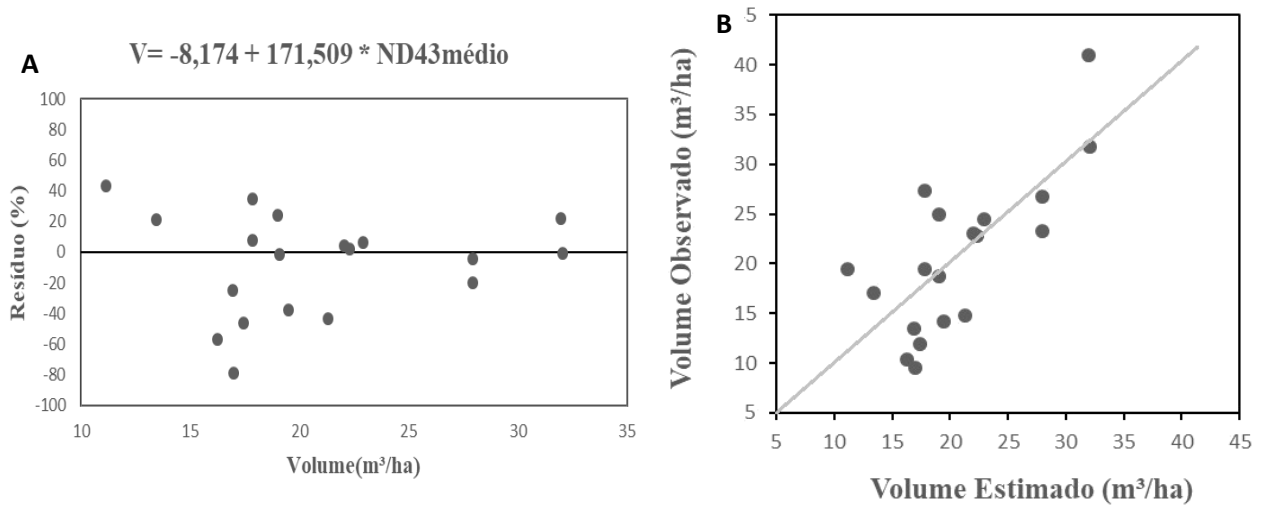


Figura 4. (A) Gráfico de dispersão de resíduo para volume estimado; (B) Dispersão dos valores estimados pela equação. Fonte: os autores.

A análise de variância apresentada na Tabela 5 mostrou que as variações nos volumes das parcelas não são explicadas pela variação nos espaçamentos de plantio, sendo possível o material genético utilizado, o sucesso das mudas, e condições do solo, fatores decisivos para um maior ou menor volume de madeira alcançado. O tratamento 01 (2,0 x 1,0m) possui o maior adensamento de árvores e maior média de volume m^3 e m^3/ha , provavelmente o ganho de volume individual das árvores em espaçamentos maiores não seja suficiente para produzir em uma área maior volume de madeira.

Tabela 5. Análise de variância para volume de madeira m^3/ha nos quatro espaçamentos. Fonte: os autores.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	valor-P	F crítico
Tratamento	94,7345	3	31,5782	0,48468	0,69763	3,23887
Resíduo	1042,44	16	65,1526	--	--	--
Total	1137,18	19	--	--	--	--

A análise de variância apresentada na Tabela 6 mostrou que as variações no índice ND43 das parcelas não são explicadas apenas pela variação nos espaçamentos de plantio, sendo possível que o perfil de dossel e forma da copa, conforme se varia volume e espaçamentos, sejam responsáveis pela variação desse índice.

Tabela 6. Análise de variância para índice ND43 em quatro espaçamentos. Fonte: os autores.

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	Fc	Valor P	F crítico
Tratamento	0,00452	3	0,00151	1,49046	0,25499	3,23887
Resíduo	0,01619	16	0,00101	--	--	--
Total	0,02072	19	--	--	--	--

Os mapas da Figura 5 representam a espacialização do volume em cada pixel m^3/ha e m^3 , respectivamente, segundo o modelo ajustado, apenas nas regiões livre de falhas no interior das parcelas e nas bordas. Os maiores valores de volumes estimados pela equação ajustada (3), mostrados nos mapas, localizam-se nas parcelas B5-2 e B5-1, e estão condizentes com os valores estimados pelo inventário através da equação (3) de Scolforo (2008).

No Figura 5.A foi possível observar falhas, onde o volume aparece próximo de 0 e baixo volume na área central do experimento e pontos de clareiras, resultados condizentes com as informações encontradas no inventário. O padrão de distribuição dos volumes está bem fiel ao volume obtido pelas informações do inventário, onde todas as parcelas ficaram dentro da mesma classe volumétrica.

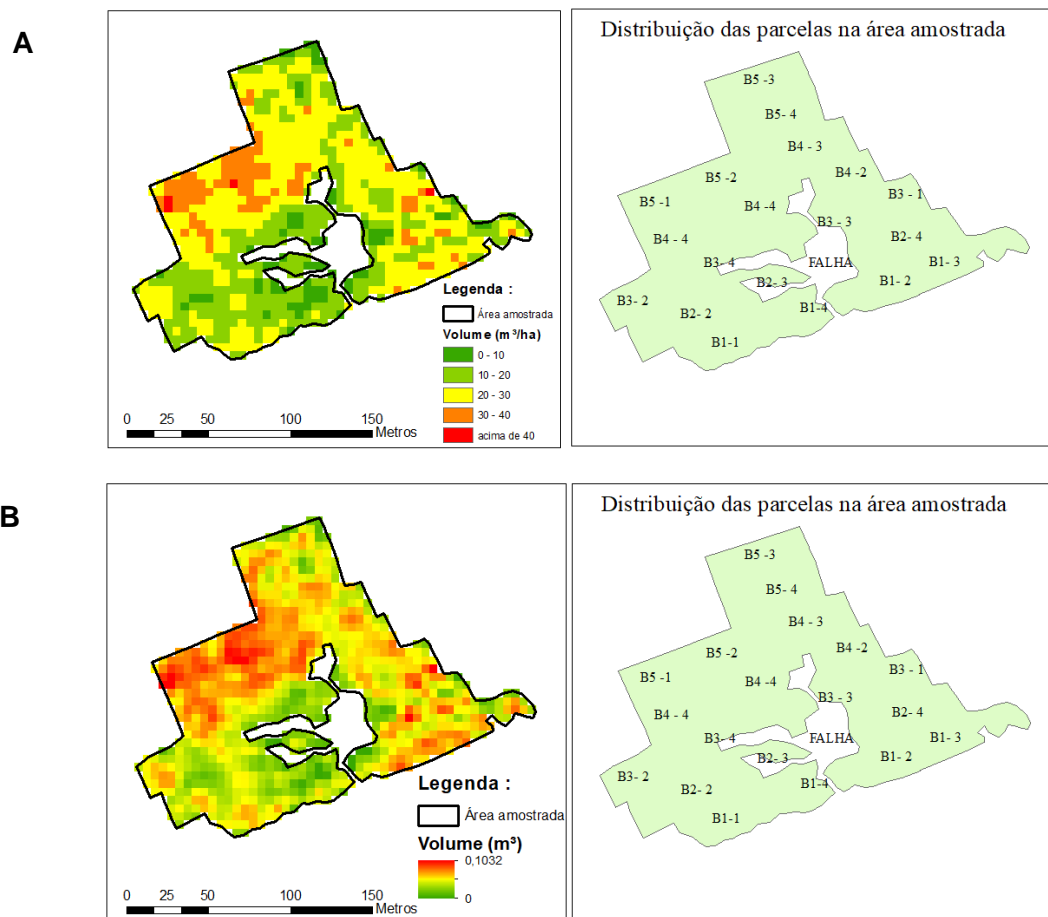


Figura 5. (A) Mapa da espacialização do volume m^3 na área amostrada estimado pela modelo equação em $m^3/há$; (B) Mapa da espacialização do volume m^3 na área amostrada estimado pela modelo equação em m^3 .

CONCLUSÕES

A partir dos resultados da pesquisa notou-se que entre os parâmetros avaliados em cada variável, os valores de índice médio se correlacionaram melhor com volume e acabaram por representarem melhor a variabilidade espacial deste dentro da parcela. A banda RedEdge apresentou maior sensibilidade em captar a variação volumétrica frente o infravermelho próximo. O modelo final acabou por apresentar apenas uma variável, já que devido aos índices serem derivados das mesmas bandas e suas correlações serem altas o efeito da multicolinearidade foi alto resultando em um modelo mais simples. O modelo apresentou boas estimativas em R^2 aj 0,51 e alto Syx 29,03%, comparado a outros trabalhos que utilizaram somente índices de vegetação como variáveis independentes para estimativa de volume. O mapa gerado pelo modelo conseguiu ser bem preciso na especialização do volume, sendo uma ótima base de informações que poderão auxiliar no estudo de tendências de produção, estimativa de volume, comportamento do plantio e sua distribuição.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alba, E. (2016). Caracterização espectral dos dosséis e estimativa de variável biofísica em plantios de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliottii* a partir de imagens Landsat 8/OLI. 2016. p. 71- 73. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- Alves, M. V. G. et al. (2013). Aplicação de *k-nearest neighbor* em imagens multiespectrais para a estimativa de parâmetros florestais. Revista Floresta. Curitiba, PR, v. 43, n. 3, p. 351-362. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v43i3.18083>
- Asrar, G. et al. (1984). Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in wheat. Agronomy Journal. v.76, n. 2, 301. <https://doi.org/10.2134/agronj1984.00021962007600020029x>
- Barros, B. S. X. et al. (2015). Uso de imagens de satélite para cálculo de volume em floresta de eucalipto no município de Botucatu/SP. Revista Energia na Agricultura, v. 30, n.1, p. 60-67. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2015v30n1p60-67>
- Berra, E. F. et al. (2012). Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. Ciência Florestal, v. 22, n. 4, p. 853-864. <https://doi.org/10.5902/198050987566>
- Clark A. et al. (2011). Promoting Sustainability in the Value Chain of Natural Bisabolol, a Brazilian Rainforest Product. New York: Columbia University. <https://www.sipa.columbia.edu/file/3128/download?token=v2i2ABRt>
- Donadelli, F. M. M. (2012). Motivações e resultados da certificação florestal: um estudo de caso cadeia de valor da candeia. Ambiente & Sociedade, v. 15, n. 3, p. 97-121. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2012000300007>

- Felix, I. M. et al. (2009). Rapideye: a nova geração de satélite de observação da Terra. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, XIV. 2009, São José dos Campos, SP. Anais. São José dos Campos: INPE. 7620 p.
- Gao, X. et al. (2000). Optical–Biophysical Relationships of Vegetation Spectra without Background Contamination. *Remote Sensing of Environment*, n.74. 610 p. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00150-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00150-4)
- Gilbert, M. A. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*. Valencia, v.82. 303 p. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00048-2)
- Gitelson, A. A. et al. (2005). Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophysical Research Letters*. University of Nebraska, Lincoln, vol. 32. p.1-4. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
- Huete, A. et al. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, n. 83, p. 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huete, A. R. (1988). Adjusting vegetation indices for soil influences. *International Agrophysics*, v.4, n.4, p. 367-376.
- Justice, C. O. et al. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 36, n. 4, p.1228-1247. <https://doi.org/10.1109/36.701075>
- Leal, F. A. (2013). Técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística aplicadas em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake para estimativa de volume. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- Loeuille, B. (2015). *Eremanthus*. Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil/FB5315>>. Acesso em 18 de julho de 2019.
- Lu, D. et al. (2004). Relationships between forest stand parameters and Landsat TM spectral responses in the Brazilian Amazon Basin. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 198, p. 149-167, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.03.048>
- Macedo, F. L. (2017). Estimativa do volume de madeira para *Eucalyptus* sp. com imagens de satélite de alta resolução espacial. *Scientia Florestalis*, Piracicaba, v. 45, n. 144, p. 237-247. <https://doi.org/dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n144.01>
- Machado, I. E. S. et al. (2017). Modelos para estimativa de variáveis florestais com a utilização de imagens multiespectrais. *Brazilian Journal of Forestry Research*. v.37, n.90, p.172. <https://doi.org/10.4336/2017.pfb.37.90.1380>
- Montgomery, D. C. et al. (2006). Introduction to linear regression analysis. John, Wiley and Sons: New York, 612p.

- Oliveira, L.T. et al. (2014). Determinação do volume de madeira em povoamento de eucalipto por escâner a laser aerotransportado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.49, n.9, p. 692-699. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014000900005>
- Pádua, J. A. P. R. et al. (2016). Spatial genetic structure in natural populatins of the overexploited tree *Eremanthus erythropappus* (DC) macleish (Asteraceae). *Biochemical Systematics and Ecology*, v. 66, p. 307-311. <https://doi.org/10.1016/j.bse.2016.04.015>
- Ponzoni, F. J., & Shimabukuro, Y. E. (2009). Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação. Embrapa Semiárido. São José dos Campos, Parêntese, 127 p.
- R Development Core Team. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2017.
- Reis, A. A. et al. (2018). Volume estimation in a Eucalyptus plantation using multi-source remote sensing and digital terrain data: a case study in Minas Gerais State, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, Basingstoke. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1530808>
- Reis, A. A. et al. (2018a). 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*, v.48, n.1, p.2-17. <https://doi.org/10.1186/s40490-017-0108-0>
- Reis, A. A. et al. (2018c). Relationship between spectral data and dendrometric variables in *Eucalyptus* sp. Stands. *Floresta e Ambiente*, v. 25, n.2, p. 2-8. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.017015>
- Rosot, M. A. D. (1989). Estudo comparativo de métodos para a avaliação volumétrica por unidade de área em um povoamento de Pinus taeda L. Curitiba. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.
- Rouse, J. W. et al. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Third ERTS Symposium Proceedings, v.1. 1973, Washignton, DC: NASA. p. 309-317. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19740022614>
- Santos, K. A. et al. (2019). Pressurized liquid and ultrasound-assisted extraction of a-bisabolol from candeia (*Eremanthus erythropappus*) wood. *Industrial Crops & Products*, v. 130, p. 428-435. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.01.013>
- Scolforo, H. F. et al. (2016a). Autoregressive spatial analysis and individual tree modeling as strategies for the management of *Eremanthus erythropappus*. *Journal of Forestry Research*, v. 27, n. 3, p. 595-603. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0185-y>
- Scolforo, J. R. S. et al. (2008). Inventário florestal de Minas Gerais: Equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa. Lavras: Editora UFPA.
- Scolforo, J. R. S. et al. (2016b). Management strategies of *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish under different initial spacing. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, n. 3, p. 298-304, 2016b. <https://doi.org/10.1590/1413-70542016403042715>

Silva, C. S. J. et al. (2012). Economic feasibility and rotation age for stands of Candeia (*Eremanthus erythropappus*). CERNE, Lavras, v. 18, n.4, p. 695-706. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602012000400020>

Silva, C. S. J. et al. (2014). Viabilidade econômica e rotação florestal de plantios de Candeia (*Eremanthus erythropappus*) em condição de risco. CERNE, v. 20, n. 1, p. 113-122. <https://doi.org/10.1590/S0104-77602014000100015>

Índice Remissivo

E

Eremanthus erythoropappus, 24

M

manejo, 13, 19, 23, 24

modelagem, 4, 27, 28, 33

P

produção de mudas, 12, 15

produtividade, 14, 18, 20, 21, 23

S

sensoriamento remoto, 25, 37

silvicultura, 7

sistema radicular, 4, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14,
15, 16, 17, 21

Sobre o organizador



  **Alan Mario Zuffo**

Engenheiro Agrônomo, graduado em Agronomia (2010) na Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT). Mestre (2013) em Agronomia - Fitotecnia (Produção Vegetal) na Universidade Federal do Piauí (UFPI). Doutor (2016) em Agronomia - Fitotecnia (Produção Vegetal) na Universidade Federal de Lavras (UFLA). Pós - Doutorado (2018) em Agronomia na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS). Atualmente, possui 165 artigos publicados/aceitos em revistas nacionais e internacionais, 127 resumos simples/expandidos, 66 organizações de e-books, 45 capítulos de e-books. É editor chefe da Pantanal editora e revisor de 18 revistas nacionais e internacionais. Professor adjunto na UEMA em Balsas. Contato: alan_zuffo@hotmail.com.



Pantanal Editora

Rua Abaete, 83, Sala B, Centro. CEP: 78690-000
Nova Xavantina – Mato Grosso – Brasil
Telefone (66) 99682-4165 (Whatsapp)
<https://www.editorapantanal.com.br>
contato@editorapantanal.com.br

