

AVALIAÇÃO DE ÍNDICES DE VEGETAÇÃO NA ESTIMATIVA DE VOLUME EM FLORESTAS DECIDUAIS: UM MODELO PREDITIVO

EVALUATION OF VEGETATION INDEX APPLIED IN VOLUME ESTIMATION IN DECIDUALS FORESTS: AN PREDICTIVE MODEL

EVALUACIÓN DE LOS ÍNDICES DE VEGETACIÓN EN LA ESTIMACIÓN DEL VOLUMÉN EN FLORESTAS DECIDUALES: UN MODELADO PREDICCTIVO

Leonardo Franklin de Carvalho

Geógrafo Especialista em Geoprocessamento, PPG Análise Modelagem de Sistemas Ambientais-DECART-IGC-UFGM, leogeografia@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-7995-9899>.

Marcelo Antonio Nero

Doutorado em Engenharia de Transportes - Escola Politécnica da USP, PPG Análise Modelagem de Sistemas Ambientais-DECART-IGC-UFGM, marcelo-nero@ufmg.br, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2124-5018>.

RESUMO: O sensoriamento remoto possibilita entender as características físicas, químicas e biológicas de um sistema florestal, de forma indireta, o que tem sido um desafio em diversas pesquisas. Correlacionar os dados oriundos destes sensores com aqueles dados amostrais adquiridos em campo, através de coletas e medições das formações florestais, pode ser uma estratégia bastante eficaz no entendimento da estrutura florestal e de todo o fragmento a ser estudado. A revisão bibliográfica sobre o assunto permitiu uma análise e discussão sobre as metodologias utilizadas nos estudos acadêmicos, em especial, os índices de vegetação, extraídos de dados adquiridos por imagens de satélite, bem como sua correlação com os dados primários de inventário florestal, utilizando-se do modelo estatístico de regressão linear. O desenvolvimento prático do trabalho se deu sobre um fragmento florestal de fitofisionomia denominada Floresta Estacional Decidual (Mata Seca) em Funilândia, Minas Gerais, Brasil, onde foram coletadas 8 (oito) parcelas amostrais devidamente inventariadas e submetidas às análises estatísticas em escritório. Nesta pesquisa foi encontrada uma forte correlação entre os índices de vegetação, em especial o GNDVI (0,82), e os volumes de madeira das amostras coletadas em campo. Esse fato permitiu atingir o principal objetivo da presente pesquisa, o qual foi realizar a extrapolação do volume de todo fragmento florestal estudado por meio do modelo preditivo.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Regressão linear; Inventário florestal.

ABSTRACT: Remote sensing makes it possible to understand the physical, chemical and biological characteristics of a forest system, indirectly, which has been a challenge in several studies. Correlating data from these sensors with field-acquired sample data, through forest formations collection and measurements, can be a highly effective strategy in comprehending forest structure and the entire fragment under study. A literature review on the subject enabled an analysis and discussion about methodologies used in academic studies, particularly vegetation indices extracted from satellite image data, as well as their correlation with primary forest inventory data, using the statistical model of linear regression. The practical development of the work took place in a forest fragment of a phytogeographic formation called Seasonal Deciduous Forest (Dry Forest) in Funilândia, Minas Gerais, Brasil, where 8 (eight) sampled plots were duly inventoried and subjected to statistical analyses in the office. In this research it was found a strong correlation between vegetation indices, especially the GNDVI (0,82), and the wood volumes of the samples collected in the field. This fact allowed the main objective of this research to be achieved, which was to extrapolate the volume of the entire forest fragment studied using the predictive model.

Keywords: Remote sensing; Linear regression; Forest inventory.

RESUMEN: La teledetección permite comprender las características físicas, químicas y biológicas de un sistema forestal, desde la manera indirecta, lo que resulta un desafío en las más distintas líneas de investigación. Correlacionar los datos que tienen sus orígenes de estos sensores con los que son obtenidos en campo desde la coleta y mensuración de las formaciones forestales posibilita el empleo de una estrategia en términos de la comprensión de la estructura forestal además del fragmento de lo que se estudia. La revisión de la bibliografía en cuanto a este tema ha permitido un análisis y la discusión en cuanto a las metodologías empleadas en los estudios académicos y en especial se llevamos en cuenta los índices de vegetación obtenidos desde los datos de imágenes satelitales, además de suya correlación con los datos primarios de los inventarios forestales con el uso del modelado estadístico obtenidos desde la regresión lineal. El desarrollo práctico de este trabajo ha sido hecho desde un fragmento forestal cuyo nombre es Foresta Estacional Decidual (Mata Secuia) en Funilândia, Minas Gerais, Brasil, en donde fueran colectadas 8 (ocho) parcelas muestrales inventariadas y suministradas as análisis estadístico en oficina. En esta investigación se ha encontrado una fuerte correlación entre los índices de vegetación, en especial el GNDVI (0,82) y los valores de madera de los muestreos obtenidos desde la colección del campo. Dicha constatación nos ha permitido llegar al principal objeto de esta investigación, lo cual ha conducido a la extrapolación del volumen del conjunto completo del fragmento forestal mediante la utilización de un modelado predictivo.

Palabras clave: Teledetección; Regresión lineal; Inventario forestal.

1. INTRODUÇÃO

O sensoriamento remoto (SR) aplicado às análises ambientais vem obtendo ganhos significativos nos estudos acadêmicos, tais como em diversas pesquisas recentes apresentadas em Ma *et al.* (2024), Tran e Liou (2024), Xing *et al.* (2024), Zong *et al.* (2024), por exemplo. Entender a interação entre a radiação solar e a vegetação tem sido um desafio recorrente neste processo. A troca de energia da vegetação com o meio é objeto de estudo fundamental neste tema e no presente artigo.

A radiação eletromagnética revela um espectro de informações sobre sua dinâmica, estrutura e ciclo fenológico, bem como diversos parâmetros biofísicos. É a partir da interação com a energia eletromagnética, que os dados de vegetação e de outros objetos são transmitidos aos sensores, transformando-se, por meio de sua frequência, intensidade e polarização, em informação (ROCHA, 2007).

Considerando-se o SR aplicado à estudos ambientais, existe uma gama enorme de publicações, sendo possível destacar alguns trabalhos recentes. Santori (2022) buscou a definição de componentes puros (*pixels*) de vegetação, solo e água com base em seus comportamentos e assinaturas espectrais auxiliando na interpretação dos usos e cobertura da terra, bem como dos índices de vegetação. Assis *et al.* (2023) realizaram técnicas de SR direcionadas ao monitoramento das variabilidades espectrais da cultura de café em Monte Carmelo-MG. Campos *et al.* (2023) realizaram o mapeamento do serviço ecossistêmico de sequestro de carbono prestado pela vegetação florestal nativa do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro e da Zona de Amortecimento no município de Areia, no Estado da Paraíba-BR, a partir do índice CO₂flux (resultante da integração entre os índices NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*- Índice de Vegetação da Diferença Normalizada e sPRI- *Normalized Photochemical Reflectance Index* – índice de Reflectância Normalizado), destacando a importância de áreas protegidas florestais para a manutenção do sequestro e armazenamento de carbono. Hu *et al.* (2023) desenvolveram uma pesquisa voltada para a detecção das mudanças dos usos e cobertura da terra aplicando técnicas de NDVI na Província do Punjab - Paquistão. Neitzel e Vieira (2023) realizaram uma análise temporal de dados florestais, com base nos dados do Mapbiomas e imagens *Landsat*, no município de Joinville, Santa Catarina-BR. Marion *et al.* (2024) avaliaram a influência da temperatura e da precipitação na variação anual do NDVI, do RENDVI (*Red Edge Normalized Difference Vegetation Index* - Índice de Vegetação de Diferença Normalizada de Borda Vermelha) e do EVI (*Enhanced Vegetation Index* – Índice de Vegetação Melhorado), em área de Floresta Estacional Semidecidual em regiões dos municípios de Marmeleiro e de Renascença, no Sudoeste do Estado do Paraná-BR, utilizando imagens do satélite RapidEye (nível 3A) do ano de 2018 sem cobertura de nuvens, os autores constataram que o EVI apresentou melhor correlação com a temperatura média mínima e com a temperatura média, pelo fato de ser mais influenciado pelo índice de área foliar (IAF, controlado pelas estações do ano). Entretanto, o NDVI e o RENDVI foram mais influenciados pela precipitação e apresentaram maior correlação com a precipitação acumulada entre 30 e 60 dias anteriores ao imageamento.

O modelo de regressão linear é um dos modelos de causalidade mais utilizados na estatística para prever determinado fenômeno. Modelos preditivos buscam a quantificação de determinados dados para identificação de padrões e, em um segundo momento, visualização de tendências futuras. Jesus e Miura (2009) utilizaram modelo preditivo para estimar os índices de vegetação e comparar as diferenças dos usos e coberturas da terra utilizando-se de dados multitemporais. Oliveira (2020) estimou as variáveis biofísicas de volume, biomassa e carbono correlacionando tais variáveis com os índices de vegetação.

Considerando-se as várias referências citadas anteriormente pode-se afirmar que, no contexto da presente pesquisa, o SR é uma importante ferramenta auxiliar em inventários

florestais convencionais, direcionando os trabalhos de campo e, principalmente, diminuindo o tempo e custo dos estudos. Desta forma, o mapeamento de áreas florestais através da utilização de dados obtidos por sensores, torna o estudo relativamente prático e viável quando se segue uma metodologia apropriada à pesquisa. O que se propõe neste artigo é a análise de ferramentas e caminhos que melhor se adaptam ao objeto de estudo, para se chegar ao resultado satisfatório na extrapolação dos dados estatísticos das características biofísicas da vegetação, utilizando-se das parcelas de inventário florestal como unidades amostrais.

Correlacionar os dados adquiridos pelos sensores orbitais dos satélites: disponibilizados pela constelação *Planet*, com aqueles adquiridos em trabalhos de campo: através de parcelas amostrais, pode fornecer ao pesquisador informações importantes do espaço amostral analisado, quando houver entre os dados uma forte correlação. Neste sentido, o objetivo da presente pesquisa é analisar a aplicação de regressão linear entre os índices de vegetação e os dados quantitativos de parcelas de campo oriundas de inventários florestais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

Foi analisado neste estudo um fragmento florestal, inserido em uma propriedade no município de Funilândia, Minas Gerais-BR, de coordenadas geográficas: 44°01'10"O e 19°26'40"S (**Figura 1**).

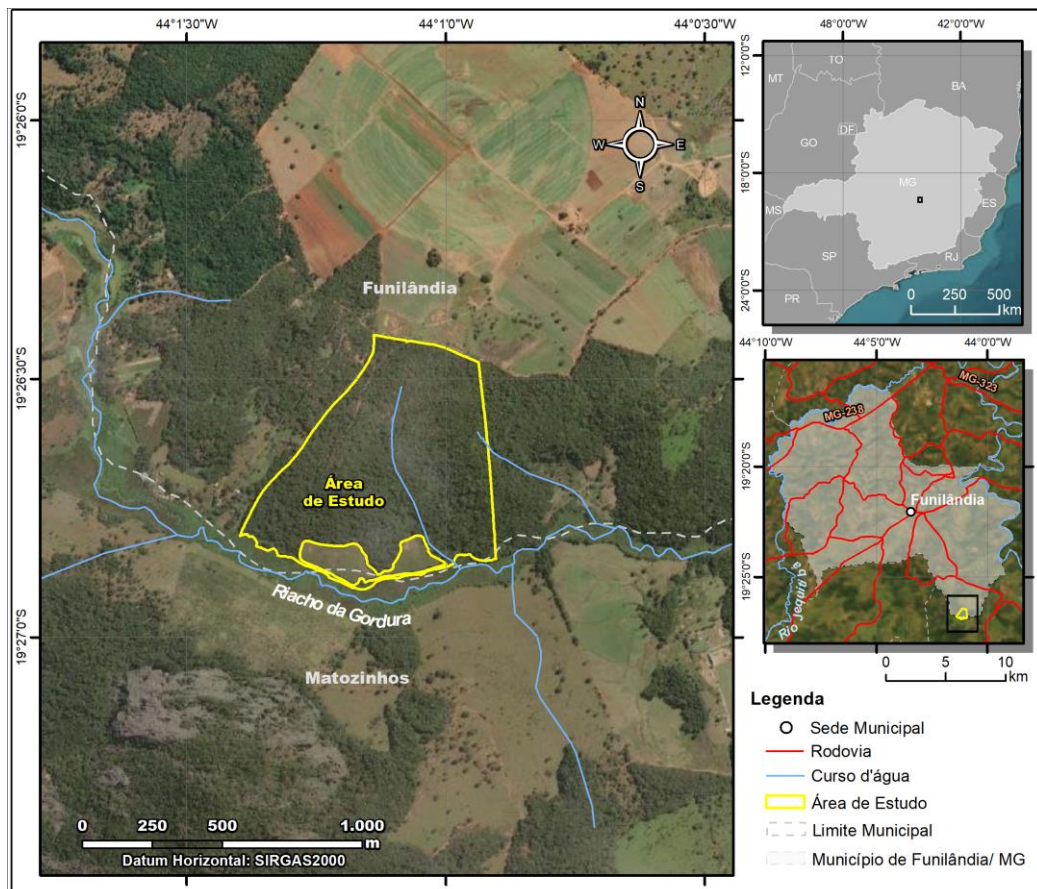


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Elaborada pelo autor (2024).

O clima para esta região é caracterizado, segundo IBGE (2018), como subquente: com média entre 15° e 18°C em pelo menos 1 mês; e semi-úmido: 4 a 5 meses secos. A precipitação média anual é de 1.400 mm e sua distribuição anual é marcada por dois períodos: um seco (de junho a setembro) e outro chuvoso (de dezembro a março). Os outros meses são considerados de transição. Se apresenta em uma unidade geomorfológica denominada Depressão do Alto São Francisco e em uma escala mais local de análise, seu relevo se apresenta com colinas amplas e suaves, com declividades que variam entre 3 e 10 graus. De acordo com o mapeamento do solo realizado por SEMAD e UFV (2010), o solo da região é caracterizado como argissolo vermelho-amarelo (PVAe18), de textura média/argilosa e permeabilidade moderada. A fitofisionomia do fragmento florestal estudado é caracterizada como Floresta Estacional Decidual (Mata Seca) de acordo com o mapeamento regional do IEF – Instituto Estadual de Floresta, no ano de 2019 e confirmado em campo nos estudos do inventário florestal.

2.2. Métodos

O fluxograma (Figura 2), a seguir descreve os métodos desenvolvidos:

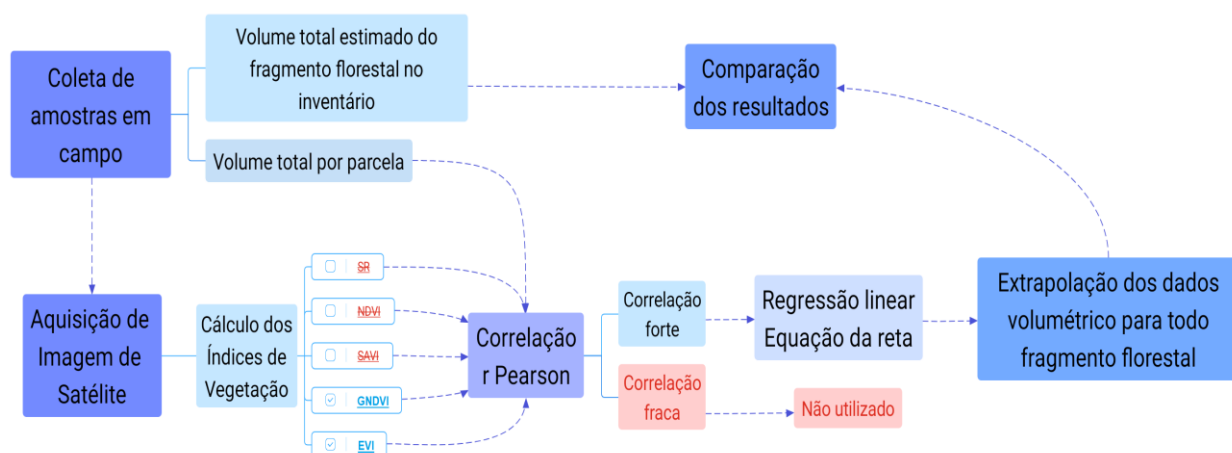


Figura 2: Fluxograma do trabalho prático desenvolvido. Fonte: Elaborada pelo autor.

A metodologia começa com a coleta das amostras de campo por meio do inventário florestal tradicional. Com os dados do levantamento tratados em escritório tem-se o volume total estimado do fragmento florestal, bem como o volume por parcela. Concomitantemente, com a aquisição de imagens de satélite são calculados índices de vegetação para cada parcela espacializada, pra que se possa correlacioná-los com os dados de volumetria do inventário florestal de cada amostra. Os índices que apresentarem forte correlação com a volumetria são submetidos a equação da reta em uma regressão linear simples, obtendo desta forma, a extrapolação dos dados volumétricos para todo fragmento florestal.

2.2.1 Índices de Vegetação

Para o cálculo dos índices de vegetação foram utilizadas as imagens *Planet* (L15-0773E-0911N) de junho de 2016, estação de seca, mesmo período do ano em que o levantamento florestal foi executado em campo. As imagens são coletadas pela constelação de satélites *Dove* com 4 bandas espectrais: azul, verde, vermelho e infravermelho próximo. Possuem resolução espacial de aproximadamente 5 m, são ortorretificadas e com resolução radiométrica de 12 bits.

A vegetação se apresenta como um dos objetos mais complexos de ser interpretado nos estudos com SR como destacado em Menezes (2024). A começar pelas diferenciadas reflexões foliares que a vegetação apresenta em uma estrutura florestal. A orientação foliar, as estruturas de dossel, o estado de degradação e os estágios sucessionais interferem na intensidade da energia eletromagnética captada pelos sensores dos satélites (PONZONI, 2009). Para além destas características, este último autor considera as reflexões de outros objetos que compõem e até mesmo se apresentam no entorno da estrutura florestal que refletem suas propriedades, como é o caso do solo, dos corpos d'água, entre outros.

A escolha do índice de vegetação, que melhor represente a área a ser estudada, é de extrema importância na elaboração de um estudo. Para análise de uma estrutura florestal deve-se buscar índices com maior sensibilidade e que apresentam forte correlação com os dados quantitativos dos inventários florestais. Isto se justifica em Oliveira (2020), onde a autora cita determinados índices escolhidos em sua pesquisa (EVI e SAVI) que não demonstraram ser apropriados para estimar as variáveis biofísicas dos fragmentos florestais, enquanto o índice NDVI se mostrou eficiente, mesmo que em apenas uma estação climática.

Diversos índices de vegetação utilizados em diferentes fitofisionomias, como vistos em Huete (2002); Jensen (2009); Nakai (2016) e Bussinguer (2024). Tais índices são obtidos através de combinações matemáticas entre as faixas espectrais, em especial nas faixas do vermelho, do infravermelho próximo, do azul e verde, as duas últimas em menor proporção. No espectro magnético, estas faixas são as que apresentam maior sensibilidade na interação entre a energia eletromagnética e a vegetação, isto porque a planta absorve maior energia na faixa do azul e do vermelho e reflete mais na faixa do infravermelho próximo (MOREIRA, 2011).

Os principais índices de vegetação na literatura acerca do assunto e utilizados neste estudo são os descritos a seguir:

1) Razão Simples (SR)

$$SR = IVP/V$$

Em que: IVP = infravermelho próximo; V= vermelho

Principais características: Sensível a variações de biomassa, principalmente em grandes dimensões (florestas) e ao IAF (Índice de Área Foliar); Bom indicador de crescimento de culturas (JENSEN, 2009).

2) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

$$NDVI = (IVP - V) / (IVP + V)$$

Em que: IVP = infravermelho; V = vermelho

Principais características: Elimina parcialmente as interferências atmosféricas; Auxilia no monitoramento de mudanças sazonais no desenvolvimento da vegetação; Reduz ruídos presentes em múltiplas bandas, como sombras de nuvens, variações topográficas e diferença de iluminação solar (HUETE *et al.*, 2002 *apud* NAKAI, 2016); Maior sensibilidade da variação do substrato sob o dossel e o solo; A maior ocorrência de sombras no interior do dossel de florestas primárias pode apresentar valores inversos de NDVI em relação às florestas secundárias (PONZONI, 2009); Os valores variam de -1 a 1. Valores negativos representam corpos d'água, próximo de 0 o solo exposto e próximo de 1 uma vegetação de maior vigor e densidade; É um índice menos sensível às variações nos altos valores de biomassa; oposto do que ocorre com o índice SR (JENSEN, 2009).

3) Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI)

$$SAVI = (1+Ls)(IVP-V) / (Ls+IVP+V)$$

Em que: Ls = fator de ajuste do índice; IVP = infravermelho próximo; V = vermelho. Valores de L = **0,25** para vegetação densa, **0,5** para vegetação com densidade intermediária e **1** para vegetação com baixa densidade (HUETE, 1988 *apud* Oliveira, 2020). Valor de L = 0 torna a fórmula de SAVI igual a do NDVI.

Principais características: Ajuste do NDVI quando a superfície não está completamente coberta pela vegetação; Considera os efeitos do solo exposto.

4) Índice de Vegetação por Diferença Normalizada Verde (GNDVI)

$$GNDVI = (IVP-G) / (IVP+G)$$

Em que: IVP = infravermelho próximo; G = verde

Principais características: O índice de GNDVI é uma modificação do NDVI, que também usa infravermelho próximo, mas substitui a banda vermelha pela banda verde; Este índice mede o conteúdo de clorofila com mais precisão do que os índices de NDVI; Utilizado para detectar culturas murchas ou envelhecidas e para medir o teor de nitrogênio nas folhas quando um canal vermelho extremo não estiver disponível, monitora a vegetação com copas densas ou em estágios de maturidade.

5) Índice de Vegetação Melhorado (EVI)

$$EVI = (IVP-V) / (L+IVP+C1*V-C2*A)$$

Em que: L = fator de ajuste para o solo; C1 e C2 = coeficientes de ajuste para efeito de aerossóis da atmosfera; IVP = infravermelho próximo; V = vermelho; A = azul. L = 1; C1 = 6 e C2 = 7,5 (HUETE *et al.*, 1997; JUSTICE *et al.*, 1998 *apud* NAKAI, 2016).

Principais características: Desenvolvido para aperfeiçoar a captação do sinal da vegetação; Melhorar a sensibilidade de detecção em regiões com maior densidade de biomassa; Melhorar o monitoramento da vegetação com a redução do sinal do solo e das influências atmosféricas sobre a resposta do dossel (PONZONI, 2009); Se assemelha com o NDVI, no entanto com fatores de ajuste para o solo e coeficiente de resistência para atmosfera, que descrevem o uso da banda azul para correção da banda vermelha; O comprimento de onda na faixa do azul é usado por estar relacionado ao conceito de resistência atmosférica (HUETE *et al.*, 2002, *apud* NAKAI, 2016); É mais sensível às variações estruturais do dossel, arquitetura da copa, fisionomia da planta e aumento de biomassa, retardando o ponto de saturação (HUETE *et al.*, 2002 *apud* NAKAI, 2016).

A análise dos índices citados também se norteou pelo que Jensen (2009), descreve em seus estudos sobre suas características. Segundo o autor, um índice de vegetação ideal deve ser sensível à vegetação, insensível ao solo, não ter interferências atmosféricas, permitir comparações espaciais e temporais e acoplar parâmetro biofísico mensurável no campo, tanto em quantidade quanto em qualidade de amostras, para avaliar o vigor da cobertura vegetal.

2.2.2 Regressão Linear

A regressão linear simples estuda a relação entre a variável dependente (y) e uma variável independente (x). Esta relação se apresenta por meio de um modelo matemático que associa tais variáveis (RODRIGUES, 2012).

O modelo de regressão linear simples é expresso pela equação 1:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad (1)$$

Em que: **y_i** - representa o valor da variável dependente - y (volume, biomassa ou carbono)
x_i - representa o valor da variável independente - x (índice de vegetação); **β₀** e **β₁** - representam os parâmetros dos modelos, em que **β₀** representa o ponto em que a reta intercepta o eixo dos yy quanto x = 0 e é chamado de interceptor ou coeficiente linear. O parâmetro **β₁** representa a inclinação da reta regressora, indica a mudança na média de y para um aumento de uma unidade em x (RODRIGUES, 2012, p. 5). Tais parâmetros podem ser encontrados pelas equações 2 e 3 (GAITHER e FRAZIER, 2006 *apud* MEDEIROS e BIANCHI, 2009):

$$\beta_0 = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (2)$$

$$\beta_1 = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3)$$

Na análise em questão as variáveis independentes (x) – (índices de vegetação GNDVI e EVI) foram utilizadas, separadamente, na equação como auxiliares da variável dependente estimada (y) – Volume. Como os índices de vegetação foram obtidos e analisados, para toda área de estudo: *pixel a pixel*, temos um “censo populacional” destas informações (Figura 3).

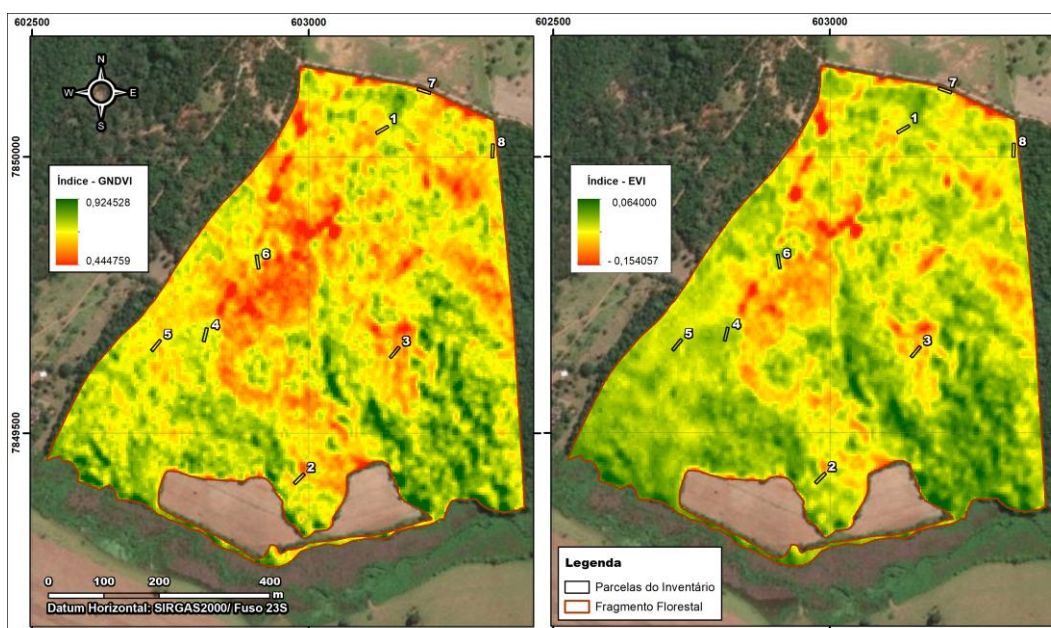


Figura 3: Mapa de distribuição dos Índices de Vegetação GNDVI e EVI. Fonte: Elaborada pelo autor.

Estes dados, em que há sobreposição entre os índices e às parcelas inventariadas, foram tabulados seguindo seus valores correspondentes para compor as equações 2 e 3 supracitadas. Na sequência é apresentado o modelo de tabulação utilizando o GNDVI como exemplo, (Tabela 1):

Tabela 1: Tabulação dos valores que compõem as equações 2 e 3 para GNDVI.

| xi (GNDVI) | yi (Volume) | xi ² | yi ² | xi.yi |
|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 0,676745 | 2,06325 | 0,457984 | 4,257001 | 1,396294 |
| 0,664199 | 1,13625 | 0,441116 | 1,291064 | 0,754696 |
| 0,659388 | 1,04283 | 0,434793 | 1,087494 | 0,68763 |
| 0,704067 | 2,01782 | 0,49571 | 4,071598 | 1,42068 |
| 0,688848 | 2,15089 | 0,474512 | 4,626328 | 1,481636 |
| 0,700053 | 1,90432 | 0,490074 | 3,626435 | 1,333125 |
| 0,667795 | 1,19009 | 0,44595 | 1,416314 | 0,794736 |
| 0,668518 | 1,46579 | 0,446916 | 2,14854 | 0,979907 |
| ∑xi : 5,429613 | ∑yi : 12,97124 | ∑xi²: 3,687099 | ∑yi²: 22,52477 | ∑(xi.yi): 8,848705 |

Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

De acordo com Gusson (2014), esta técnica de amostragem dupla diminui o número amostral das variáveis de maior complexidade: volume, biomassa e carbono, obtidas nas amostras das parcelas, diminuindo também os custos e tempo de execução do inventário. O autor completa, expondo as hipóteses testadas em sua tese, que em florestas nativas restauradas da Mata Atlântica, o índice de vegetação NDVI apresenta adequada correlação com a biomassa florestal, constituindo um processo de amostragem confiável para quantificar estoques de biomassa e carbono em florestas nativas, com precisão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Amostragem de Campo

O presente estudo analisou 8 (oito) parcelas, de um total de 29 (vinte nove), do inventário florestal, realizado em junho de 2012 em um fragmento florestal no município de Funilândia/MG.

O levantamento fitossociológico foi feito pelo método de amostragem casual estratificada. Cada parcela alocada em campo abrangeu uma área de 125 m² (5m x 25m) delimitada com auxílio de trena. Em cada parcela foram mensurados todos os indivíduos com CAP (circunferência da altura do peito) ≥ 15 cm. A altura total foi aferida com vara graduada de 2 em 2 m. Para os indivíduos com bifurcação de fustes abaixo de 1,30 m de altura, foram estimadas as alturas de seus múltiplos troncos. Na Tabela 2 é possível verificar as coordenadas das parcelas e sua estratificação e na Figura 4 é possível observar a distribuição espacial das amostras (parcelas) no fragmento florestal. As parcelas foram demarcadas em campo com fita zebra em seu início e fim, balizadas com barbante em seu eixo principal e lateral.

Tabela 2 – Coordenadas das parcelas e estrato (Datum Horizontal: SIRGAS2000/ Fuso 23S).

| Parcela | Coordenada E (m) | Coordenada N (m) | Estrado |
|---------|------------------|------------------|---------|
| 1 | 603132,54 | 7850049,39 | 1 |
| 2 | 602982,92 | 7849417,69 | 2 |
| 3 | 603155,27 | 7849646,51 | 2 |
| 4 | 602812,83 | 7849678,56 | 1 |
| 5 | 602723,87 | 7849659,05 | 1 |
| 6 | 602907,54 | 7849810,02 | 1 |
| 7 | 603207,95 | 7850119,63 | 2 |
| 8 | 603332,30 | 7850011,29 | 2 |

Fonte: Elaborada pelo Autor. Coleta com GNSS/RTK (*Global Navigation Satellite System/Real Time Kematic*).

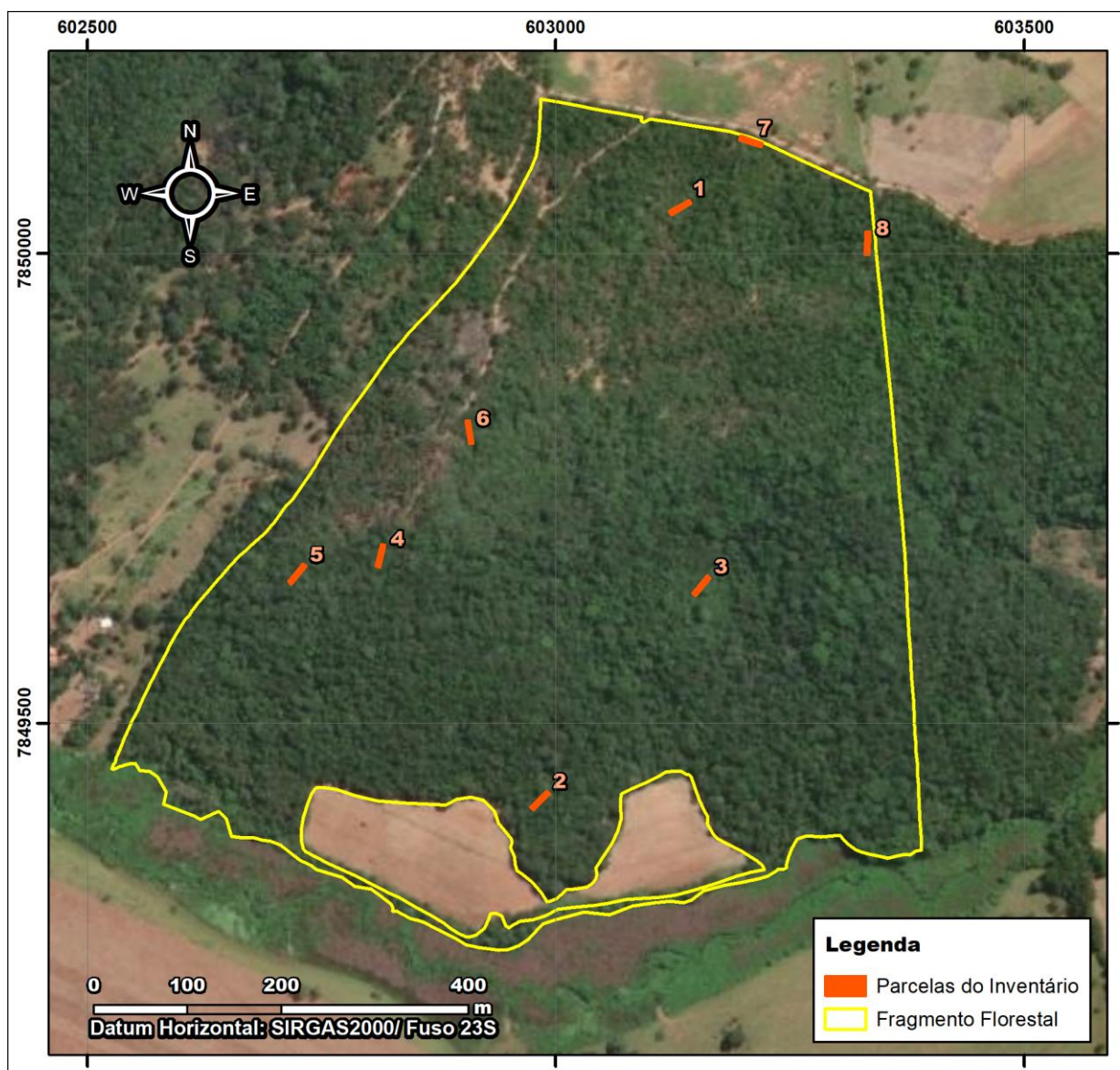


Figura 4: Mapa de distribuição espacial das amostras. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2. Aplicação da Estatística Amostral

As equações utilizadas para o cálculo de estatística da amostragem casual estratificada buscaram uma precisão estatística de 10% em um nível de probabilidade de 90%. O erro amostral do inventário para volumetria utilizando-se das 8 parcelas foi de 4,94%.

O modelo para estimar o volume total do inventário florestal foi o sugerido por CETEC (2005). A fórmula do modelo volumétrico é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Fórmula para o volume total do fragmento florestal.

| Tipologia | Volume total |
|-----------|---|
| Mata Seca | $V_t = 0,000074924 * DAP^{1,818557} * H_t^{1,061157}$ |

Fonte: CETEC/MG, 2005.

Em que: DAP = Diâmetro a altura do peito (cm); V_t = Volume total (m^3); H_t = Altura total (m).

A Tabela 3 mostra os resultados de volumetria para cada parcela:

Tabela 3: Dados de volume do inventário florestal por parcela.

| Parcelas | N | VT (m^3) | Média DAP | Média H_t | VT (m^3/ha) |
|----------|----|--------------|-----------|-------------|-----------------|
| 1 | 42 | 2,0633 | 8,84 | 7,01 | 165,0600 |
| 2 | 40 | 1,1363 | 8,45 | 5,6 | 90,9000 |
| 3 | 40 | 1,0428 | 8,02 | 6,19 | 83,4264 |
| 4 | 40 | 2,0178 | 9,47 | 7,1 | 161,4256 |
| 5 | 40 | 2,1509 | 9,48 | 6,49 | 172,0712 |
| 6 | 43 | 1,9043 | 9,82 | 5,86 | 152,3456 |
| 7 | 26 | 1,1901 | 11,08 | 5,5 | 95,2072 |
| 8 | 27 | 1,4658 | 9,94 | 7,8 | 117,2632 |

Fonte: Elaborada pelo Autor. N – Número total de indivíduos da espécie correspondente; VT – volume total; DAP – diâmetro à altura do peito; H_t – altura total; VT/ha – volume total por hectare.

Para o cruzamento dos dados de campo com os dados de sensoriamento remoto foi utilizada preliminarmente a análise do coeficiente de correlação de Pearson. Este teste mede a relação estatística entre duas variáveis contínuas, com intervalo de coeficiente variando entre -1 e 1. O valor de 0 indica que não há associação entre as duas variáveis. Uma correlação forte é apresentada o quanto mais próximo de -1 ou 1 for o seu coeficiente. Valores positivos indicam uma correlação diretamente proporcional, ou seja, na medida em que uma variável aumenta sua correspondente também aumenta. Já valores negativos indicam uma correlação inversamente proporcional, na medida em que uma variável aumenta sua correspondente diminui (SOUSA, 2019).

3.3. Comportamento dos Índices de Vegetação

Diante dos índices de vegetação calculados, verificaram-se aqueles índices considerados os mais apropriados por obterem as maiores correlações com o fragmento florestal estudado para

a extrapolação de sua volumetria.

Neste sentido, os índices GNDVI e EVI obtiveram uma correlação forte e positiva com os coeficientes de $r = 0,82$ e $r = 0,81$, respectivamente. Os índices NDVI e SAVI obtiveram coeficientes iguais de $r = 0,59$, considerados como correlações moderadas. É provável que tal coeficiente, no caso do NDVI, revele as dificuldades de se trabalhar com este índice em vegetações menos densas e/ou caducifólias como é o caso da Mata Seca na área de estudo. No caso do SAVI, apesar dos cálculos terem o fator de ajuste (0,5: para vegetação com densidade intermediária), ele não obteve uma correlação significativa. Por fim, o índice SR foi o que obteve a menor correlação, bastante próxima das antecessoras, chegando ao valor de $r = 0,56$, considerada também como moderada.

Nos estudos de Sousa e Ponzoni (1998) o GNDVI se mostrou eficiente ao analisar as mudanças em volumes de madeira. Alba (2016) pontua que este índice vem sendo utilizado por demonstrar correlações significativas com os parâmetros biofísicos.

Diante dos resultados, optou-se por correlacionar os índices de vegetação GNDVI e EVI com os dados biofísicos de volume (m^3) das parcelas inventariadas em campo, por meio da regressão linear (Tabela 4).

Tabela 4: Dados de GNDVI e EVI x Volume total por parcela.

| Parcelas | GNDVI | EVI | VT (m^3) |
|----------|----------|----------|--------------|
| 1 | 0,676745 | -0,02169 | 2,0633 |
| 2 | 0,664199 | -0,02179 | 1,1363 |
| 3 | 0,659388 | -0,02617 | 1,0428 |
| 4 | 0,704067 | -0,01751 | 2,0178 |
| 5 | 0,688848 | -0,01848 | 2,1509 |
| 6 | 0,700053 | -0,01953 | 1,9043 |
| 7 | 0,667795 | -0,02775 | 1,1901 |
| 8 | 0,668518 | -0,02324 | 1,4658 |

Fonte: Elaborada pelo Autor.

Ao tabular (Tabela 1) e calcular (equações 1, 2 e 3) os dados das parcelas e índices, obteve-se as seguintes equações da reta (equações 4 e 5):

$$VT (m^3) = -13,5925613002304 + (22,4162809396987 \times GNDVI) \quad (4)$$

$$VT (m^3) = 2,16976422678467 + (33,4273660754471 \times EVI) \quad (5)$$

Os cálculos foram feitos em ambiente SIG, em que é possível inserir, em conjunto, fórmulas e arquivos matriciais, como as imagens de satélites utilizadas neste estudo. O volume total do fragmento florestal obtido com o GNDVI foi de 6.677,74 m^3 , com o EVI o volume total obtido foi de 6.634,37 m^3 . São valores bem próximos daquele levantado em campo pelo inventário florestal tradicional, levando-se em consideração as 8 amostras estudadas. Ambos os valores atingiram 97% do volume total estimado no inventário com as mesmas amostras, apresentando o valor de 6.865,73 m^3 .

3.5 DISCUSSÃO

Neste estudo, os índices GNDVI e EVI foram os que melhor estimaram a variável dependente: volume, apresentando correlações fortes de $r = 0,82$ e $r = 0,81$, respectivamente.

O índice SR – Simple Ratio não se mostrou adequado, obtendo uma correlação moderada de $r = 0,56$. É possível que para florestas densas e de grandes extensões este índice se mostre mais apropriado, como descrito em Souza, *et al* (2012), a exemplo das florestas estacionais semidecíduais e ombrófilas densas, ambas em estágio médio e avançado de regeneração, cujos dosséis se apresentam mais contínuos e de área foliar mais intensa. Já para florestas em estágio inicial de regeneração, em que há uma estrutura de árvores espaçadas e menos desenvolvidas, seu uso, de acordo com a mesma autora, seria menos eficaz.

O uso do índice NDVI em florestas com diferentes texturas, de grandes ou pequenos fragmentos florestais, se mostrou, em grande parte das bibliografias consultadas, o melhor índice para análise do conjunto florestal de uma paisagem. No entanto, para o presente estudo se mostrou menos eficaz ($r = 0,59$) do que o índice de vegetação da diferença normalizada com a banda verde (GNDVI) e o EVI.

Em alguns estudos, tais como: Oliveira (2020) que estimou variáveis biofísicas em floresta tropical seca; e Menezes (2024) que utilizou indicadores biofísicos aplicados em monitoramento ambiental, utilizaram ajustes referentes à maior ou menor densidade da vegetação. Este ajuste está relacionado com o solo, ou seja, quanto menos densa for a floresta, mais interferência do solo haverá na energia eletromagnética refletida por ela. Um importante índice que se utiliza deste fator de ajuste é o SAVI, que neste estudo obteve uma correlação de $r = 0,59$, também classificada como moderada, sendo menos eficaz que as anteriores.

Quanto ao método de regressão linear, pode-se afirmar que este apresentou-se como um importante modelo estatístico para se estimar o volume dos fragmentos florestais estudados quando correlacionados com os índices de vegetação GNDVI e EVI. Diante da forte correlação apresentada entre os dados, a utilização da regressão linear, por meio da equação da reta, pôde fornecer resultados de volumetria muito próximos ($6.677,74 \text{ m}^3$ e $6.634,37 \text{ m}^3$) daquele obtido no inventário florestal ($6.865,73 \text{ m}^3$).

4. CONCLUSÕES / CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em se tratando de análises em formações florestais, como abordado neste artigo, os índices de vegetação estudados pelas literaturas diversas se mostraram menos eficazes na medida em que a estrutura florestal se diferenciava, tornando necessária a mudança de determinados índices de acordo com a vegetação estudada. Nas referências estudadas observou-se a utilização mais frequente de 3 índices de vegetação e com melhores resultados nos estudos investigados, a exemplo de: Gusson (2014), Oliveira (2020) com NDVI; Menezes, (2024) com SAVI; e Nakai, (2016) com SR. No entanto, nesta pesquisa os resultados apontaram para os índices GNDVI e EVI pelo fato de que ambos obtiveram uma forte correlação ($r = 0,82$ e $r = 0,81$) entre os dados de volumetria do inventário florestal.

O índice NDVI, a princípio, permite uma análise menos assertiva entre os efeitos, às vezes significativos, da sazonalidade na vegetação, como é o caso da floresta decídua pesquisada

neste trabalho. No entanto, nos estudos bibliográficos ele diminui sua eficácia também em florestas secundárias de estágio inicial, pois, a heterogeneidade de sua estrutura e, principalmente a interferência do solo por entre as copas, se mostraram sensíveis a este índice.

No caso do índice SAVI é possível que a ausência de solo exposto no fragmento florestal contínuo estudado possa ter justificado os valores moderados de tal coeficiente, mesmo aplicando o fator de ajuste de 0,5.

Parágrafo retirado do artigo por não desviar o objetivo principal do estudo.

Contudo, considerando-se a regressão linear, tem-se que seu modelo de predição, utilizando-se da variável independente índice de vegetação, pôde contribuir de forma significativa para execução de inventários florestais, fornecendo uma visão mais geral e assertiva da área estudada, diminuindo custos e tempo de execução nos números de amostras coletadas em campo.

Ao correlacionar os índices de vegetação que melhor respondam as características biofísicas de uma vegetação (GNDVI e EVI) com a volumetria, é possível prever o volume de determinado fragmento florestal antes mesmo de ir a campo para executar o inventário. Além de se obter o volume estimado, bem próximo do que se obtém em campo, permite calcular as diferentes volumetrias ao longo do fragmento, sugerindo ao autor do inventário, a espacialização prévia das áreas dentro do fragmento em que há maior ou menor volume.

REFERÊNCIAS

ALBA, E. Caracterização Espectral dos Dosséis e Estimativa de Variável Biofísica em Plantios de *Eucalyptus grandis* e *Pinus elliotti* a Partir de Imagens Landsat 8/ OLI. **Dissertação de Mestrado em Recursos Florestais e Engenharia Florestal** – Universidade Federal de Santa Maria – Santa Maria, 2016.

ASSIS, P. H. de S.; DEROCO MARTINS, G.; ORLANDO, V. S. W. Mapeamento de Parâmetros Agronômicos do Cafeeiro a Partir de Imagens Tomadas por Aeronave Remotamente Pilotada. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 43, n. 01, 2023. DOI: 10.5216/bgg.v43i01.63274. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/63274>. Acesso em: 8 nov. 2023.

BUSSINGUER, Jales de Freitas. Compreensão da resposta de índices de vegetação sar sobre o cerrado brasileiro. 2024. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/63274>. Acesso em: 8 nov. 2023.

CAMPOS, Jean Oliveira *et al.* Mapeamento do serviço ecossistêmico de sequestro de carbono prestado pela cobertura florestal do Parque Estadual Mata do Pau-Ferro e sua zona de amortecimento, Areia, Paraíba. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 17, n. 2, p. 115-135, 2023. Disponível em: <https://revista.ufr.br/rga/article/view/7888>. Acesso em: 19 ago. 2024.

CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS - CETEC-MG. **Determinação de equações volumétrica aplicáveis ao manejo sustentado de florestas nativas no Estado de Minas Gerais e outras regiões do país**. p. 106, Belo Horizonte, 2005.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. 8. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

GUSSON, E. Avaliação de métodos para a quantificação de biomassa e carbono em florestas nativas e restauradas da Mata Atlântica. **Tese (Doutorado em Recursos Florestais)** – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. Piracicaba, 2014.

HU, Y. *et al.* Land Use/Land Cover Change Detection and NDVI Estimation in Pakistan’s Southern Punjab Province. **Sustainability**, v. 15, n. 4, p. 3572, 2023. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3572/pdf>.

HUETE, A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v.25, p. 295-309, 1998.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUES, 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.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Diretoria de Geociências (DGC). **Mapa de Climas do Brasil**, 2018. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/b6bfa41c-07ec-4c31-83f4-262fcd628526>. Acesso em 24 de setembro de 2024.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS - IEF. **Cobertura Vegetal e Uso do Solo na Área de Abrangência do Mapa da Lei 11.428/2006 (Lei de Proteção da Mata Atlântica)**. Classificação e interpretação das imagens do sensor orbital *RapidEye*, Geoambiente, 2019. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/31b2fe8e-95b2-4804-a909-320e37a38c3b>. Acesso: 08 de março de 2024

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JESUS, S. C.; MIURA, A. K. Análise de regressão linear múltipla do índice de vegetação melhorado (EVI) a partir das bandas 3, 4 e 5 do sensor TM/Landsat 5. **ANAIS XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1103-1110.

MA, Yuchi *et al.* Transfer learning in environmental remote sensing. **Remote Sensing of Environment**, v. 301, p. 113924, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425723004765?casa_token=QpjMomDZY50AAAAA:RqmIqlZMiqzGvvyz0Z4RX6aQDlpcEuQjkyqoIeHyfZWQLWHzg_hpx-il9jCWV_-QuF9z55t35Q. Acesso em: 20 set. 2024.

MARION, Fabiano André *et al.* Influência da temperatura e da precipitação na variação anual de índices de vegetação em área de floresta estacional semidecidual, no Sudoeste do Paraná, Brasil. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 18, n. 1, p. 163-178, 2024. Disponível em: <https://revista.ufr.br/rga/article/view/8099>. Acesso em: 19 ago. 2024.

MEDEIROS, F. S. B.; BIANCHI, R. C. A aplicação do método regressão linear simples na demanda de produtos sazonais: um estudo de caso. **Disciplinarum Scientia. Serie: Ciências Sociais Aplicadas**, S. Maria, v.5, n. 1, p. 35-53, 2009.

MENEZES, Rebecca Borja Gonçalves Gomes de. **Indicadores biofísicos por sensoriamento remoto aplicado ao monitoramento ambiental da bacia hidrográfica do rio Brígida-Pernambuco**. 2024. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/57420/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20Rebecca%20Borja%20Gon%C3%A7alves%20Gomes%20de%20Menezes.pdf>. Acesso em: 20 set. 2024.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto**. 4.ed. Viçosa: Editora UFV, 2011.

NAKAI, E. S. Quantificação da biomassa e estoque de carbono em diferentes coberturas vegetais por meio de sensoriamento remoto. 154 f. **Tese (Doutorado em Ciências)** – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2016.

NEITZEL, L. C.; VIEIRA, C. V. Análise Espaço-temporal dos Remanescentes da Cobertura Vegetal da Mata Atlântica em um Município Costeiro no Sul do Brasil. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 43, n. 01, 2023. DOI: 10.5216/bgg.v43i01.73217. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/73217>. Acesso em: 8 nov. 2023.

OLIVEIRA, G. F. S. Uso de técnicas de sensoriamento remoto para estimar variáveis biofísicas em floresta tropical seca, município de Floresta – PE. **Dissertação (Mestre em Ciências Florestais)** – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2020.

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

ROCHA, C. H. B. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**. Juiz de Fora: Parêntese, 2007.

RODRIGUES, Sandra Cristina Antunes. Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações. **Relatório de estágio para obtenção do Grau de Mestre em Ensino de Matemática no 3º Ciclo do Ensino Básico e no Ensino Secundário**. Universidade da Beira Interior, p. 5, Covilhã, 2012.

SANTORI, A. R. Amostragem de componentes puros (vegetação, solo, água/sombra) em imagens de satélite Sentinel-2 como subsídios à interpretação do NDVI na Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Cruzes, Selvíria/MS. **Boletim Paulista de Geografia**, [S.L.], v.1, n. 107, p. 76-95, jan.-jun. 2022.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – SEMAD; UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA-UFV. **Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2010.

SOUZA, A.M.B.; LUCAS, A.P.O.; CRUZ, M.A.S.; BRANDINO, Z.G. Utilização de índices de vegetação na cobertura vegetal do projeto de assentamento José Emídio dos Santos, Capela-SE. **Anais VI Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto** – Geonordeste, Aracaju, SE, Brasil, 26 a 30 de novembro de 2012, UFS. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/112204/1/00093-104012.pdf>. Acesso em 25/09/2024.

SOUSA, Áurea. **Diagrama de dispersão, correlação e regressão linear**. Ponta Delgada, Portugal, 2019. Correio dos Açores: Opinião/ regional, Editora Gráfica Açoreana, p. 16.

SOUSA, C. L.; PONZONI, F. J. Avaliação de índices de vegetação e de bandas TM/ Landsat para estimativa de volume de madeira em floresta implantada de *Pinus ssp.* In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO** – Santos, 1998.

TRAN, Duy-Phien; LIOU, Yuei-An. Creating a spatially continuous air temperature dataset for Taiwan using thermal remote-sensing data and machine learning algorithms. **Ecological Indicators**, v. 158, p. 111469, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1470160X23016114>. Acesso em: 20 set. 2024

XING, Xiaoyue *et al.* The Synergy Between Remote Sensing and Social Sensing in Urban Studies: Review and perspectives. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine**, 2024. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6245518/8976286/10380634.pdf?casa_token=m0AGW1YqnX4AAAAA:4Fdaj-Ug_3f7IhKVW4e6U_m8OZW7w26S_Xn3JTpQyEKX7nbYt1QWMNIyrJAPKKB2NB01vmm0Nw. Acesso em: 20 set. 2024

ZONG, Shuo *et al.* Combining environmental DNA with remote sensing variables to map fish species distributions along a large river. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v. 10, n. 2, p. 220-235, 2024. Disponível em: <https://zslpublications.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1002/rse2.366>. Acesso em: 20 set. 2024