

INTEGRAÇÃO DE ÍNDICES ESPECTRAIS NA ESTIMATIVA DE BIOMASSA E CARBONO EM FLORESTAS DE *Eucalyptus grandis*: UM ESTUDO DE CASO COM NDVI E CO₂FLUX

INTEGRATING SPECTRAL INDICES TO ESTIMATE BIOMASS AND CARBON IN Eucalyptus grandis FORESTS: A CASE STUDY USING NDVI AND CO₂FLUX

Sidnei Fonseca GUERREIRO¹, Rosane Maria KASPARY², Flavia Luise Pereira de SOUZA³, Martha Santana MARTINS⁴, Valquíria de CAMPOS⁵, Anderson Antonio da Conceição SARTORI⁶

¹Universidade do Sagrado Coração – USC. Rua Irmã Arminda, 10-50 - Jardim Brasil, Bauru – SP.

Universidade Estadual Paulista. Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba. Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais. E-mail: sid.economia.ambiental@gmail.com

²Universidade Estadual Paulista. Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba. Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais. FACCAT - Faculdades Integradas de Taquara. E-mail: rmkaspary@gmail.com

³Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias. Avenida Universitária, 3780 - Altos do Paraíso. Botucatu – SP. E-mail: flavia.luize@unesp.br

⁴Universidade Salvador – UNIFACS. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento Regional e Urbano (PPDRU). Rua Doutor José Peroba, 251 - Stiep, Salvador – BA E-mail: marazul4525@gmail.com

⁵Universidade Estadual Paulista. Instituto de Ciência e Tecnologia - Câmpus de Sorocaba. Avenida Três de Março, 511 - Alto da Boa Vista, Sorocaba – SP. E-mail: v.campos@unesp.br

⁶Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa Soja. Parque Estação Biológica - PqEB, s/no, Brasília, DF. Unesp-Faculdade de Ciências Agrônômicas. E-mail: sartori80@gmail.com

Introdução
Materiais e métodos
Área de estudo
Dados ópticos de sensoriamento remoto
Escolha da imagem Landsat-8 para o estudo
Transformação radiométrica dos dados
Correção atmosférica
Índice de vegetação
Georreferenciamento das imagens
Resultados e discussão
NDVI
CO₂Flux
Conclusão
Referências

RESUMO - As florestas plantadas são alternativas para redução dos gases de efeito estufa, pelo acúmulo de biomassa em sua estrutura no ciclo do carbono e pelo serviço ambiental prestado no sequestro do gás, que necessita ser estimado por meio de tecnologias que possam medir sua eficiência e estoque. Este trabalho tem o propósito de estimar os valores de dois índices espectrais (NDVI e CO₂Flux), com dados de biomassa em floresta plantada da espécie *Eucalyptus grandis*. Adotou-se três cenas do satélite Landsat-8 da órbita/ponto 221/076 com resolução espacial de 30 metros. Os pontos amostrais foram obtidos através do Inventário Florestal ocorridos em dezembro de 2016, em uma área total de 2050 ha, contabilizando 119.498 indivíduos arbóreos em seis fazendas instaladas entre os municípios de Borebi e Iaras no estado de São Paulo, pertencentes a empresa Lwarcel Celulose. Os resultados apresentaram os valores de escala alto dos índices NDVI e CO₂Flux, para o NDVI valores próximos a 1 indicam vegetação densa e saudável, como os talhões de reflorestamento objeto de estudo, já os valores altos de CO₂Flux indica que a vegetação está absorvendo mais CO₂ do que está liberando, o que é positivo para o sequestro de carbono. O estudo demonstra a viabilidade de adoção dos índices para análises completa dos dados, agregando e integrando o modelo de inventário florestal difundido pelo IPCC com os de sensoriamento remoto para avaliação dinâmica do setor florestal.

Palavras-chave: NDVI. CO₂Flux. Sensoriamento Remoto. Eucalipto.

ABSTRACT - Planted forests offer alternatives for reducing greenhouse gases by accumulating biomass in their structure in the carbon cycle and providing the environmental service of carbon sequestration. This reduction needs to be estimated using technologies that can measure the efficiency of these forests and the carbon stock they contain. The purpose of this study was to estimate the values of two spectral indices (NDVI and CO₂Flux), using biomass data from a planted forest of *Eucalyptus grandis*. Three Landsat-8 satellite images taken at orbit/point 221/076 with a spatial resolution of 30 meters were used. The sample points were obtained from a forest inventory conducted in December 2016, covering a total area of 2050 ha, which contained 119,498 trees on six farms located between the municipalities of Borebi and Iaras in the state of São Paulo, belonging to the company Lwarcel Celulose. The results showed high NDVI and CO₂Flux indices. NDVI values close to 1 indicate dense, healthy vegetation, such as the reforestation area under study, while high CO₂Flux values indicate that the vegetation is absorbing more CO₂ than it is releasing, which is positive for carbon sequestration. The study demonstrates the feasibility of adopting the indices for complete data analysis, aggregating and integrating the forest inventory model disseminated by the IPCC with remote sensing for a dynamic assessment of the forestry sector.

Keywords: NDVI. CO₂Flux. Remote Sensing. Eucalyptus.

INTRODUÇÃO

As florestas desempenham papel importante no ciclo global do carbono (Chlamadinger & Marland, 1996; Pan et al. 2011). Não somente por possuir quantidades expressivas em reserva de estoque em forma de biomassa vegetal, mas também pela troca ativa que realiza com a atmosfera em um fenômeno natural (Barba et al., 2018). Além da própria condição biológica vegetal, o serviço ambiental que as florestas prestam é substancial, para que os efeitos das externalidades negativas antrópicas sejam absorvidos e regenerados em um processo ecossistêmico complexo (Hayde & Semmler, 2018).

No ano de 2012, a área de floresta plantada com espécies de *Eucalyptus spp.* no Brasil foi de 5.102.030 ha. Somente o estado de São Paulo contribui com uma área plantada de 1.104.695 ha. Destaca-se entre os principais produtos gerados do processamento do eucalipto: celulose, papel, painéis de madeira industrializada, madeira processada mecanicamente, siderurgia a carvão vegetal, lenha, pallets, entre outros (ABRAF, 2013).

O eucalipto é uma planta de alta produtividade madeireira e com menores custos e maiores taxas de retorno de investimento, o que confere grande atratividade econômica ao cultivo (Vale et al., 2014). De acordo com a CIB (2008), um hectare de eucalipto, remove 60 toneladas de CO₂ da atmosfera. O plantio desta cultura surge como uma solução, pois são excelentes sequestradores de CO₂, viabilizando com extrema eficiência o estoque de carbono em todos os reservatórios de biomassa.

A expansão das áreas florestais, tanto de mata nativa ou de floresta plantada apresenta-se como oportunidade viável para aumentar a dissipação de carbono terrestre, contribuindo para redução de concentração atmosférica do CO₂. (Schroeder, 1992).

A preocupação ambiental com que a sociedade defronta com relação à manutenção de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera é relativamente recente (Goudie, 2018). Até meados do século passado era impossível imaginar que as ações realizadas pelos homens pudessem causar algum impacto significativo no clima ou na sobrevivência do sistema terrestre (Manzato, 2018). No entanto, a história tem evidenciado o oposto, especialmente, com relação ao aumento da quantidade de CO₂ na atmosfera que não necessariamente seja um fenômeno antrópico, mas um fato natural solar (Molion, 2008).

As florestas plantadas disponibilizam uma série de serviços sociais e ambientais, que vão desde a reabilitação de terras degradadas, o combate à desertificação do solo, sequestro e armazenamento de carbono (Guerreiro et al., 2019). As zonas tropicais do mundo parecem particularmente atraentes para o reflorestamento, devido às altas taxas de produtividade que podem ser atingidas e por haver grandes áreas de terra que se beneficiariam da plantação do gênero *Eucalyptus* (Nascimento, 2017). Um importante adicional desta espécie florestal, trata-se na cooperação na minimização do aquecimento global, pois considera-se esta ser a mais eficiente no sequestro do gás carbônico (CO₂) da atmosfera (CIB, 2008).

A mensuração e quantificação do CO₂ em florestas contribui para o planejamento e o uso sustentável dos recursos. Obter esses dados agregando tecnologia via sensoriamento remoto permite que o setor florestal, que possui alta representatividade econômica se insira em um patamar de transformação conceitual (Barba et al., 2018) e que agrega valores técnicos mensurados e validados pelo geoprocessamento, contribuindo para a expansão científica gerando percepções voltados para a sustentabilidade ambiental do setor (Berra et al., 2012; Guerreiro et al., 2021).

A adoção de dados via sensores remotos para aplicação do estudo na estimativa de biomassa apresenta vantagens comparativas em relação ao IF adotado e difundido pelo IPCC, pois reduz tanto o custo quanto o tempo necessário para a contabilização do IF (Polonio, 2015; Manzato, 2018). As análises de cobertura vegetal, consentem avaliar todas as fases de crescimento, acúmulo de biomassa e carbono superveniente da dinâmica de crescimento vegetativo da árvore (Bacha, 2008).

O sensoriamento remoto com a apuração de estimativas de índices como o NDVI e CO₂Flux tem um papel fundamental na quantificação das áreas e na estimativa indireta de biomassa, aplicando resultados de modelos e equações desenvolvidas com valores digitais de refletância (Clancy, 2018). E com o avanço constante no processamento das imagens e desenvolvimento dos satélites resulta em uma crescente adoção desses métodos para caracterização estrutural das florestas, e com isso os valores de biomassa e carbono estocados nas mesmas e que será alvo e objetivo dessa análise.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo localiza-se nas divisas dos municípios de Lençóis Paulista, Agudos e Bauru no estado de São Paulo (Figura 1). A Lwarcel

produz, anualmente, 250 mil toneladas de celulose de fibra curta de eucalipto, matéria-prima utilizada na fabricação de diversos tipos de papéis no Brasil e no exterior.

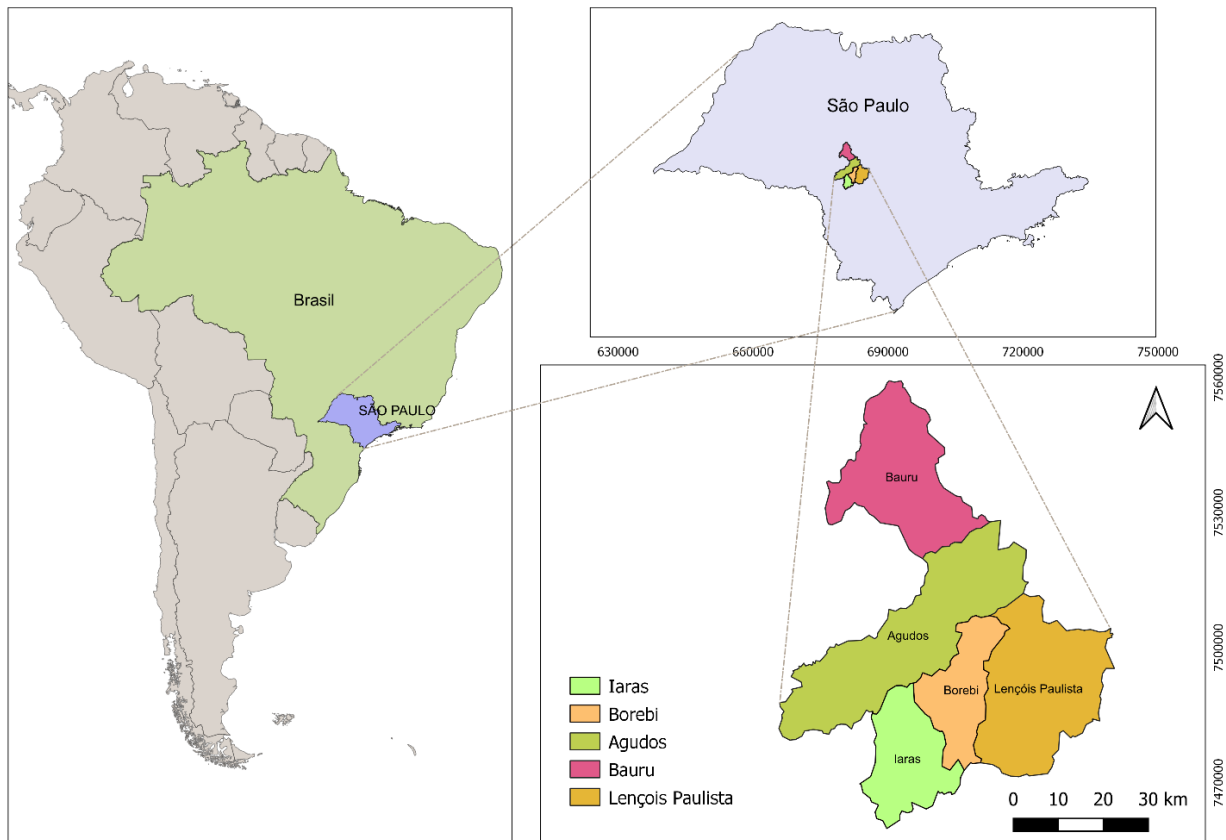


Figura 1 - Mapa de localização da área do estudo de caso.

Toda a madeira consumida pela empresa é proveniente de florestas plantadas de eucalipto, grande parte das florestas possuem o sistema de manejo certificado pelo FSC® (*Forest Stewardship Council*®) e são planejadas e executadas levando em consideração a necessidade de proteger a biodiversidade, os recursos naturais, a fauna e a flora. (Guerreiro et al., 2021).

Dados ópticos de sensoriamento remoto

Este estudo utilizou cenas do satélite *Landsat-8* com resolução radiométrica de 16 bits, resolução temporal 16 dias, projeção da imagem UTM, *Datum* WGS84, (projeção cilíndrica) sendo necessário projetá-las para o hemisfério Sul. O tamanho aproximado da cena Landsat-8 é de 170km ao norte-sul por 183 km de leste a oeste.

As bandas concedidas passaram por correção atmosférica usando *Semi-Automatic Classification Plugin* que é um complemento do QGIS que realiza a classificação *pixel a pixel* das cenas capturadas do Landsat-8 (Congedo, 2016), e logo

realizado a reprojeção para o hemisfério sul. Agregado a esse intervalo os limites das fazendas e pontos amostrais para aplicação das equações descritas na metodologia.

A cena foi adquirida de forma gratuita no portal GLOVIS: *The USGS Global Visualization Viewer*. A plataforma Landsat-8 opera com dois instrumentos disposto na Tabela 1, sendo o primeiro, *Operational Land Imager* (OLI), com nove bandas espectrais, incluindo a banda pancromática e o segundo *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), com duas bandas termais (USGS, 2023).

Devido à alta incidência de nuvens que podem estar presentes durante os meses próximos à realização do inventário, justifica-se o processamento das imagens. Nas cenas adquiridas, foram realizados os seguintes processamentos digitais: transformação radiométrica dos dados, correção atmosférica, correção geométrica e geração dos índices de vegetação. Estas etapas metodológicas se encontram no fluxograma da Figura 2.

Tabela 1 - Características do Satélite Landsat-8

Instrumentos	Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (metros)
Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Banda 1- Coastal aerosol	0,43 - 0,45	30
	Banda 2- Azul	0,45 - 0,51	30
	Banda 3- Verde	0,53 - 0,59	30
	Banda 4- Vermelho	0,64 - 0,67	30
	Banda 5- Infravermelho próximo (NIR)	0,85 - 0,88	30
	Banda 6- SWIR 1	1,57 - 1,65	30
	Banda 7- SWIR 2	2,11 - 2,29	30
	Banda 8- Pancromática	0,50 - 0,68	15
	Banda 9- Cirrus	1,36 - 1,38	30
	Banda 10- termal infravermelho (TIRS)	10,60 - 11,19	100* (30)
	Banda 11- termal infravermelho (TIRS) 1	11,50 - 12,51	100* (30)

Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS). *TIRS bandas foram adquiridas com resolução de 100 metros, mas foram reamostrados para 30 metros em dados de entrega (USGS, 2023).

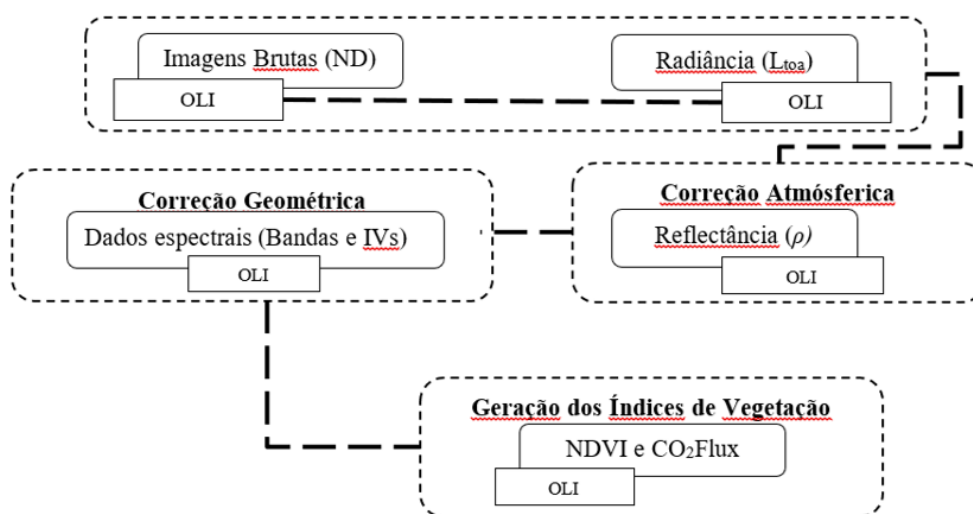


Figura 2 - Fluxograma do processamento digital das imagens OLI do Landsat-8. Fonte: Manzato (2018).

Escolha da imagem Landsat-8 para o estudo

Os resultados da cena órbita/ponto 221/076 capturada pelo Landsat-8 em que a amostra na data do inventário correspondia a uma média de idade de 5,65 anos foi a 2016219CUB00 com data de 6 de agosto de 2016. Todas as imagens selecionadas para o estudo são referentes a órbita 221 e ponto 076, com as seguintes datas:

- LO82210762016107CUB00 – 16 de abril de

2016.

- LO82210762016219CUB00 – 06 de agosto de 2016.
- LO82210762017253CUB00 – 10 de setembro de 2017.

Ao qual recobriu as seguintes datas de referências de cobertura das fazendas de acordo com a tabela 2 em relação a idade da contabilização do IF.

Tabela 2 - Definição de Cena por Fazenda pelo IF dezembro de 2016. Fonte: IF 2016

Fazenda	Idade Média	Área (ha)	Cena Landsat-8
SANTA RITA	5,12	148,45	LO82210762016219CUB00
SÃO LUIZ	5,20	188,17	LO82210762016219CUB00
TURVINHO I	5,19	220,25	LO82210762016219CUB00
	5,55	34,72	LO82210762017253CUB00
TURVINHO II	5,88	230,69	LO82210762016107CUB00
	5,44	584,77	LO82210762016219CUB00
	6,43	129,04	LO82210762017253CUB00
TURVINHO III	6,30	99,29	LO82210762016107CUB00
	5,90	95,23	LO82210762016219CUB00
	6,10	144,37	LO82210762017253CUB00
TURVINHO IV	6,00	44,85	LO82210762016219CUB00
	6,08	130,74	LO82210762017253CUB00
Total	5,77	2.050,57	

Para compreensão segue a figura 3 com o esquema de etapas para definição do período de cena considerado no estudo, e na figura 4, os pontos amostrais destacados conforme o IF de dezembro de 2016, com seus respectivos pontos

espaciais onde os pontos em verde correspondem ao período de idade em agosto de 2016, os pontos em azul referem-se ao período de abril de 2016 e por fim os pontos em laranja corresponde aos talhões com dados de setembro de 2017.

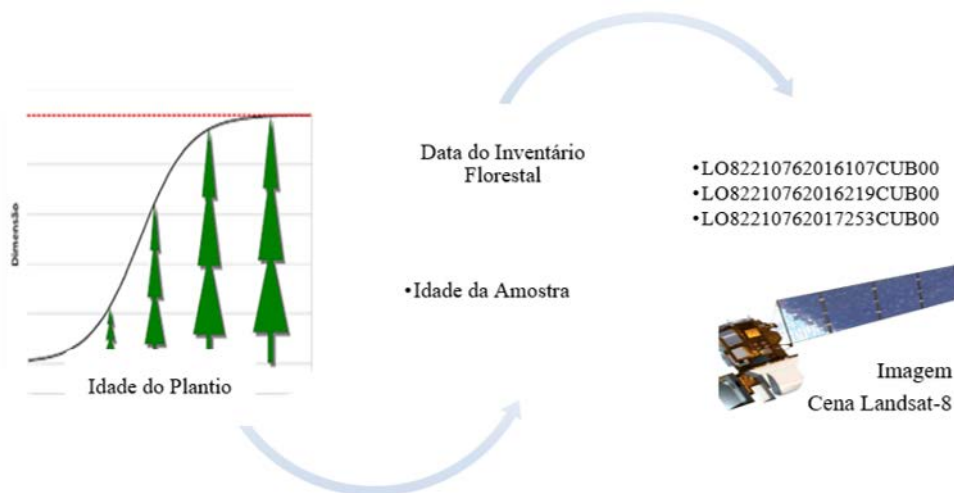


Figura 3 - Esquema de seleção de cena temporal Landsat-8 da amostra.

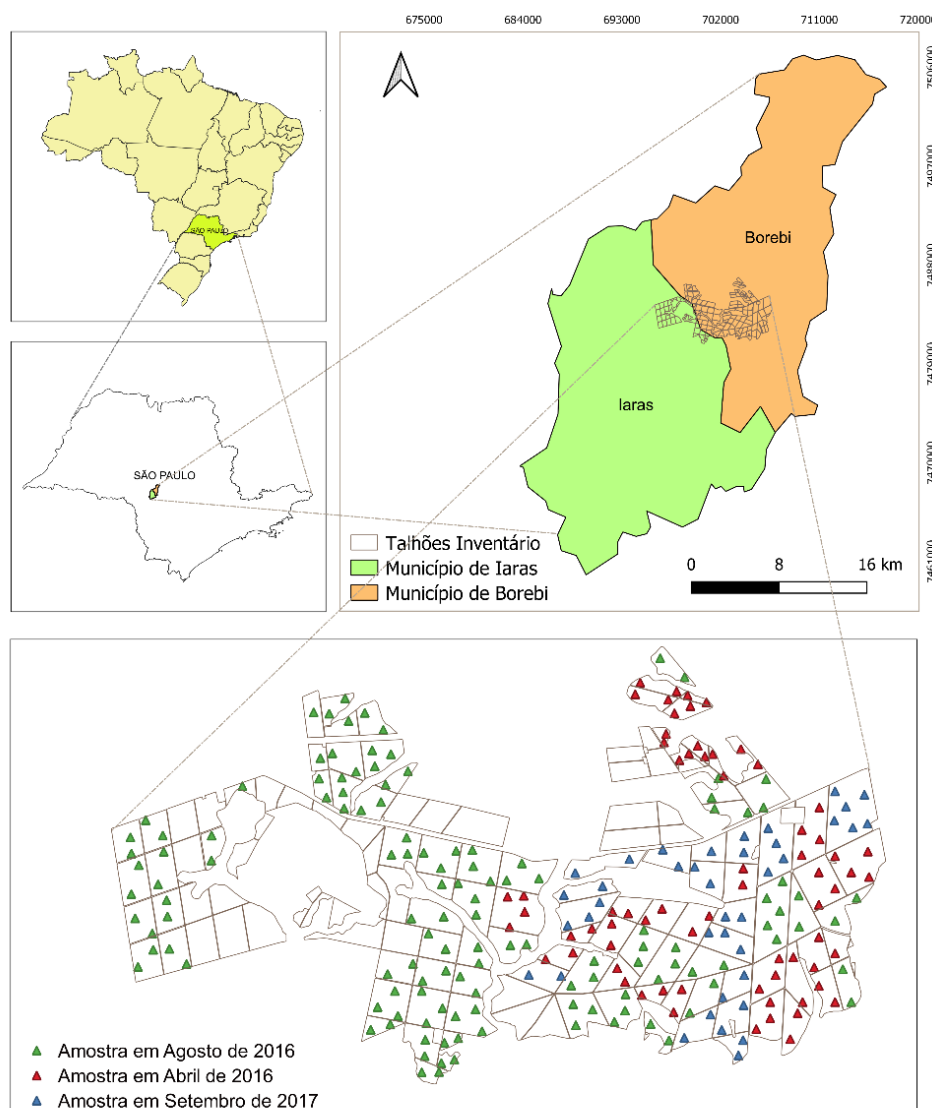


Figura 4 - Pontos amostrais por talhões e fazenda divididos pelo período amostral e definido nas imagens das cenas.

Transformação radiométrica dos dados

O sensor a bordo do satélite registra a intensidade de REM (radiância) propagada da Terra até o sensor e forma uma imagem da superfície sob este aspecto físico (Cassol, 2013). Cada detector integra este fluxo de energia que deixa a superfície (irradiância) para formar a medida de cada pixel (Meneses & Almeida, 2012).

Contudo, Thorne et al. (1997) destacam que esta conversão não é igual para cada uma das bandas do sensor, mas é função dos valores máximo e mínimo de radiância de cada um destes detectores (calibração pré-lançamento), característicos em cada um dos comprimentos de onda ou bandas (Schou et al., 2012).

Assim sendo, quando a intuito é trabalhar com informações quantitativas oriundas de dados de sensoriamento remoto, torna-se indispensável a alteração radiométrica, que consiste na conversão dos ND em radiância aparente ou radiância no topo da atmosfera (Markham & Barker, 1986).

Neste estudo as bandas dos instrumentos OLI (números digitais) foram convertidas para o topo da atmosfera (TOA), em radiância espectral, usando os elementos de brilho redimensionado fornecidos no arquivo de metadados, registrado na Equação (1).

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad 1$$

onde:

L_{λ} : TOA radiância espectral ($W m^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$);

M_L : Banda específica fator redimensionado multiplicador a partir dos metadados Radiância_Mult_Banda_ L , onde L é o número da banda;

A_L : Banda específica fator escalonado aditivo a partir de metadados da Radiância_Add_Banda_ L , onde L é o número da banda;

Q_{cal} : Produto quantificado e calibrado padrão em valores de pixel (ND).

A banda OLI também foi convertida para TOA reflectância planetária através dos coeficientes de reflectância redimensionado fornecidos no (arquivo MTL). Para converter valores digitais OLI para reflectância TOA, foi usada a Equação 2:

$$\rho\lambda' = M_{\rho} Q_{cal} + A_{\rho} \quad 2$$

onde:

$\rho\lambda'$: TOA reflectância planetária, sem correção para o ângulo solar ($W m^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$);

M_{ρ} : Banda específica do fator multiplicador

redimensionando da reflectância Mult Banda_ ρ , onde ρ é o número da banda;

A_{ρ} : Banda específica do fator redimensionando da reflectância Add Band ρ , onde ρ é o número da banda;

Q_{cal} : Produto padrão quantificado e calibrado dos valores dos pixels (DN).

Correção atmosférica

A correção atmosférica consiste na minimização da contribuição do espalhamento e absorção da REM sobre as importâncias do Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) registrados pelo sensor. Quando os efeitos atmosféricos são corrigidos da imagem, têm-se o FRB de superfície (BRDF) ou simplesmente reflectância (σ), termo este usado para facilitar a compreensão.

As imagens foram convertidas para valores de reflectância em cada uma das bandas e sensores, a partir do modelo de redução atmosférica por transferência radiativa *Moderat spectral resolution atmospheric transmittance algorithm* (MODTRAN4) (Antunes et al., 2012).

Correção geométrica

As imagens “reflectância” foram exportadas para o ArcGIS 10.1, logo georreferenciadas no mesmo sistema de referência SIRGAS 2000 e projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 22s, dos arquivos *shapefile*, contendo os pontos das árvores e os polígonos das parcelas permanentes.

Esta etapa metodológica foi de suma importância, porque os dados de campo devem se ajustar o mais perfeitamente possível aos dados registrados pelos sensores, visando corrigir distorções geométricas em imagens, de modo a torná-las georreferenciadas e espacialmente precisas. Este processo é crucial para garantir a exatidão e a qualidade das informações extraídas das imagens em análises subsequentes (Cassol, 2013).

Índices de vegetação

Os índices de vegetação foram estabelecidos com base nas imagens de reflectância de cada uma das bandas do sensor OLI. Os IVs que foram utilizados no estudo:

a) O **Índice de Vegetação por Diferença Normalizada - NDVI** (*Normalized Difference Vegetation*) trata-se de um dos índices de vegetação com maior aplicação em pesquisas espaciais florestais. Ele se fundamenta na alta absorção da clorofila que é verificada na região

espectral do vermelho e na alta reflectância esclarecida pela composição interna das folhas na região do infravermelho próximo. O valor de NDVI altera entre -1 e 1. Comumente em vegetações saudáveis, o índice exibe valores em torno de 0,2 e 0,8 (Polonio, 2015). O NDVI é expresso pela Equação 3.

$$\text{NDVI} = (\text{IV}-\text{V})/(\text{IV}+\text{V}) \quad 3$$

onde:

IV é o fluxo radiante refletido no infravermelho próximo e V o fluxo radiante refletido no vermelho da região do visível.

b) O **Índice de Reflectância Fotoquímico - PRI** (*Photo Synthetic Reflectance Index*) foi estabelecido para aferir a eficácia fotossintética empregando as bandas de reflectância nos comprimentos de onda do azul e do verde (Moreira et al., 2005). O PRI da Equação 4 é sensível às alterações nos pigmentos de carotenoides (principalmente a xantofila) na folhagem. Tais pigmentos são sinais da eficiência do uso da luz fotossintética ou da taxa de CO₂ contida pela folhagem por unidade de energia absorvida. Esse índice é aproveitado em matérias de estresse e de produtividade da vegetação. Os valores variam entre -1 e 1 e valores comuns para vegetação sadia ficam entre -0,2 e 0,2 (Polonio, 2015; Manzato, 2018).

$$\text{PRI} = (\text{R1}-\text{R2}) / (\text{R1}+\text{R2}) \quad 4$$

onde:

R1: Reflectância relativa à banda 2 do Landsat-8;

R2: Reflectância relativa à banda 3 do Landsat-8

O PRI expressa à relação entre as bandas do verde e azul e, segundo Rahman et al. (2000),

pode ser relacionado com a eficiência do uso da luz no processo fotossintético. Salienta-se, porém, que os dados de PRI devem ser reescalados para valores positivos, gerando um novo índice, o sPRI (Equação 5). Assim, o sequestro florestal de carbono depende da integração desses dois índices (NDVI e sPRI), que geram um novo índice: o CO₂flux (Baptista, 2003, 2004).

$$\text{sPRI} = (\text{PRI} + 1) / 2 \quad 5$$

Após a realização do cálculo do índice PRI, é calculado o índice sPRI, seguindo a metodologia proposta por Rahman et al. (2000). O índice sPRI possui o mesmo significado do PRI, mas passa a ser representado em uma escala que varia entre 0 e 1 para, assim, ficar com a mesma escala do NDVI. Os índices NDVI e PRI são combinados, segundo a metodologia de Rahman et al. (2000) para gerar o índice CO₂Flux.

c) **CO₂Flux** é a integração do índice de reflectância fotoquímica, ou PRI, que representa a eficiência do uso da luz na fotossíntese, com o NDVI (Rahman et al., 2000), que representa o vigor da vegetação fotossinteticamente ativa, o que tornaria possível integrar as feições de absorção decorrentes do sequestro de carbono. A esse índice integrado, Baptista (2003) chamou de CO₂Flux.

Para determinação do fluxo de CO₂, Equação 6, estudos recentes salientam a possibilidade da utilização da integração do índice espectral NDVI e do PRI.

$$\text{CO}_{2\text{flux}} = (\text{NDVI} \times \text{sPRI}) \quad 6$$

O índice espectral PRI pode ser correlacionado com as taxas de fotossíntese e o NDVI com o sequestro de carbono. Essa integração mede a eficiência do processo de sequestro de carbono.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os sensores espectrais registraram a reflectância da amostra e a estimativa de bio-massa e carbono em floresta plantada através dos índices NDVI, PRI, sPRI e CO₂Flux.

NDVI

O NDVI foi apurado relacionando duas medidas das bandas espectrais do infravermelho próximo (800-1100 nm) e o vermelho (600-700 nm), por onde as diferenças sazonais do ângulo do Sol correspondeu a 3 cenas de períodos distintos (16 abril 2016), (06 de agosto 2016) e (10 setembro 2017), minimizando dessa forma

os efeitos da atenuação atmosférica e período de obtenção dos dados do Inventário Florestal para cada idade, talhão e fazenda distribuídos na amostra discutidas a seguir. Os pontos amostrais que apresentaram maior valor de escala do NDVI, correspondem as áreas que possuíam maior biomassa, que foram mais eficientes no processo fotossintético e sequestro e estoque de carbono (Ponzoni et al., 2010).

NDVI – abril de 2016 – Faz. Turvinho II e III

Os resultados orbitais (LO8221076) da cena capturada pelo Landsat-8 em que a amostra na

data do inventário correspondia a uma média de idade de 5,10 anos foi a 2016107CUB00 com data de 16 de abril de 2016. As Fazendas Turvinho II e III apresentaram pontos

amostrais dos talhões nessa faixa etária e os pontos máximos e mínimos de NDVI que constam na figura 5 e na tabela 3 com os resultados de escala foram analisados.

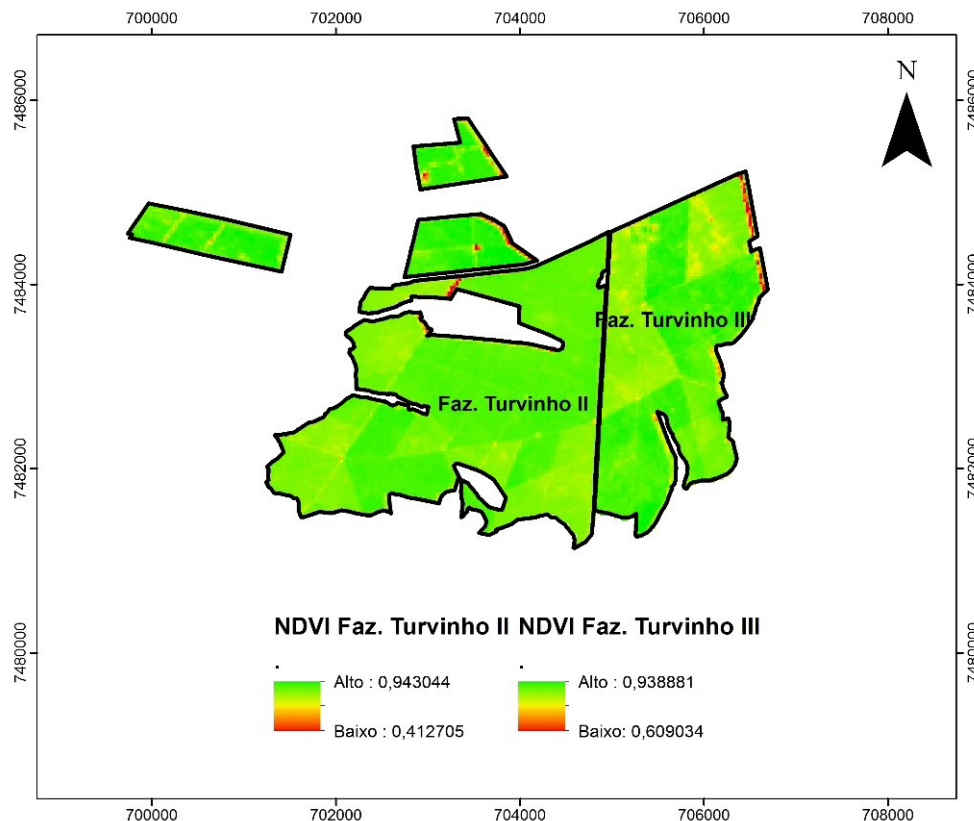


Figura 5 - NDVI do período de abril 2016. Fazenda Turvinho II e III

Tabela 3 - Escala da variação espectral NDVI abril de 2016 para Faz. Turvinho II e III

Escala	Faz. Turvinho II	Faz. Turvinho III
Alto	0,943044	0,938881
Baixo	0,412705	0,609034
Total	0,530339	0,329847

A análise apontou que no período da cena em abril de 2016 para as amostras que tinham idade de 4,94 anos para a Fazenda Turvinho II e 5,19 anos para a Fazenda Turvinho III, cena essa próxima da idade dos pontos amostrais definidos em dezembro de 2016 pelo IF, as diferenças de valores de escala expuseram na tabela 3 os índices altos para ambas as fazendas. Ou seja, conforme Almeida et al. (2015), alto vigor vegetativo e densa biomassa, característica física dos indivíduos nessa faixa etária.

NDVI – 2016219 – agosto de 2016 – Idade 5,65 anos da amostra

Os resultados orbitais (LO8221076) da cena capturada pelo Landsat-8 em que a amostra na data do inventário correspondia a uma média de idade de 5,65 anos foi a 2016219CUB00

com data de 6 de agosto de 2016. Considerando os valores de escala descritos na metodologia, ambas fazendas apresentaram valores altos do índice NDVI, indicando a presença de biomassa densa e com maior vigor vegetativo (Melo et al., 2011) nos talhões de acordo com a figura 6.

Percebe-se que as Fazendas Turvinho I e II apresentam maior variação nas escalas dos índices, em parte por constituírem as maiores áreas plantadas da amostra (254,97 ha, 944,50 ha) respectivamente, as idades dos indivíduos na Fazenda Turvinho I em dezembro de 2016 estavam entre 5,47 a 7,54 anos, respectivamente.

Na tabela 4 foi possível comparar os valores de escala entre valores altos definido pelos (tom verde) com os de menor resultado caracterizado pelos (tom vermelho).

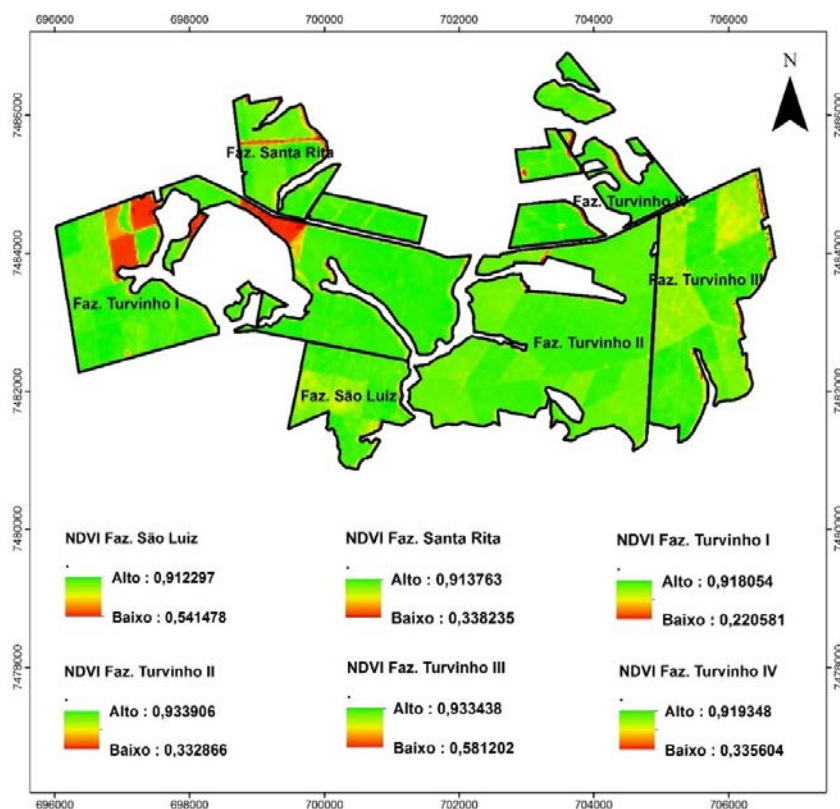


Figura 6 - NDVI do período de agosto 2016 para todas as fazendas da amostra.

Tabela 4 - Escala da variação espectral NDVI agosto de 2016

Escala NDVI	Faz. São Luiz	Faz. Santa Rita	Faz. Turvinho I	Faz. Turvinho II	Faz. Turvinho III	Faz. Turvinho IV
Alto	0,912297	0,913763	0,918054	0,933906	0,933438	0,919348
Baixo	0,541478	0,338235	0,220581	0,332866	0,581202	0,335604
Total	0,370819	0,575528	0,697473	0,60104	0,352236	0,583744

Ao comparar os resultados das Fazendas São Luiz e Turvinho III, que apresentaram valores com menores diferenças entre a escala de valores de NDVI dentre todas as fazendas, o que difere das demais pode ser explicado pelo processo de crescimento, as médias de valores de DAP médio (m), Altura média (m), Altura dominante (m) e média de Área Basal ($m^2 ha^{-1}$), dados do IF

(Polonio, 2015), que confirmaram o valor de escala maior desse índice, resultando uma maior densidade da cobertura vegetal verificada na média de idade dos indivíduos arbóreos inventariados, conseqüentemente o armazenamento maior de quantidades de carbono estocado na biomassa, encontra-se apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Valores amostrais dos dados de IF - 2016 para Faz. São Luiz e Turvinho III

FAZENDA	Média de Idade em no IF	ÁREA (ha)	Nº de amostra	Média de Fustes (ha)	DAP médio (m)	Altura média (m)	Altura média Dominante (m)	Média de Área Basal ($m^2 ha^{-1}$)
SÃO LUIZ	5,65	188,17	25,00	1.114,47	0,16	23,74	26,66	21,80
TURVINHO III	5,19	338,89	39,00	1.207,13	0,17	27,39	30,83	26,47
Total	5,38	527,06	64,00	1.169,38	0,16	25,90	29,13	24,57

Como a amostra apresentou diferença de idades nos talhões na data do inventário, foi necessário gerar outros dois índices com datas de cenas diferentes correspondentes.

NDVI - 2017253 - setembro de 2017 - Fazendas Turvinho I, II, III e IV

Os resultados orbitais (LO8221076) da cena

capturada pelo Landsat-8 em que a amostra na data do inventário correspondia a uma média de idade de 4,44 anos foi a com data de 10 de setembro de 2017 (2017253), presente nas fazendas do grupo de Turvinho visualizados na figura 7 e seus valores de escala na tabela 6.

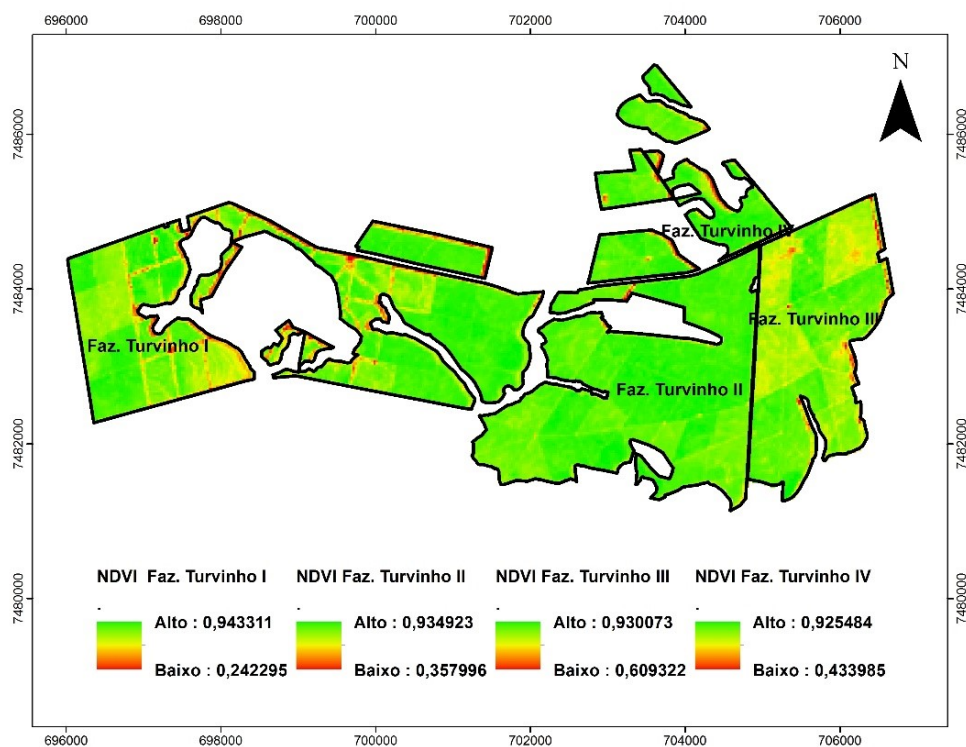


Figura 7 - NDVI do período de setembro de 2017. Fazendas Turvinho (I, II, III e IV).

Tabela 6 - Escala da variação espectral NDVI set. 2017. Faz. Turvinho (I, II, III e IV)

Escala	Faz. Turvinho I	Faz. Turvinho II	Faz. Turvinho III	Faz. Turvinho IV
Alto	0,943311	0,934923	0,930073	0,925484
Baixo	0,242295	0,357996	0,609322	0,433985
Total	0,701016	0,576927	0,320751	0,491499

O resultado do NDVI para os pontos amostrais presentes nas Fazendas Turvinho (I, II, III e IV) em relação aos pontos com maior (tom verde) vigor vegetativo, todas as fazendas apresentaram alto padrão, em contrapartida o

valor de menor escala de vigor vegetativo, foi identificado na Fazenda Turvinho II, e essa situação pode ser explicada conforme a tabela 7, com a idade média dos 29 pontos amostrais resultaram em 4,02 anos.

Tabela 7 - Valores amostrais dos dados de IF- 2016 para Faz. Turvinho (I, II, III e IV)

Fazenda	Idade IF Cena Set. 2017	ÁREA (ha)	Nº amostra	Média de Fustes (ha)	DAP médio (m)	Altura média (m)	Média Altura Domin. (m)	Média de Área Basal (m ² ha ⁻¹)
TURVINHO I	6,33	32,66	4,00	1.132	0,15	24,66	26,82	21,54
TURVINHO II	4,02	244,23	29,00	1.183	0,17	26,48	29,53	26,34
TURVINHO III	5,16	97,20	13,00	1.189	0,17	27,39	30,45	27,31
TURVINHO IV	5,18	101,83	14,00	1.150	0,17	26,83	30,21	24,48

A idade do indivíduo em seu processo de crescimento vegetativo foi responsável pela reflectância espectral dos indivíduos apurados na amostra. Esse dado, enriquece o planejamento e controle do manejo florestal e permite realizar um acompanhamento da evolução da cultura e o status de vigor vegetativo e saúde da vegetação (Andrade, 2015), para apurar a eficiência do sequestro de carbono o índice CO₂Flux foi analisado a seguir.

CO₂FLUX

CO₂Flux - abril de 2016 – Fazendas Turvinho II e III

Em duas Fazendas, Turvinho II e III, os pontos amostrais pelos talhões necessitaram ser abordados em respeito a data de IF para abril de 2016. Os valores de escala mais alta e mais baixo estão dispostos na tabela 8 e apresentaram uniformidade, com pontos de escala respectivamente demonstrados na figura 8.

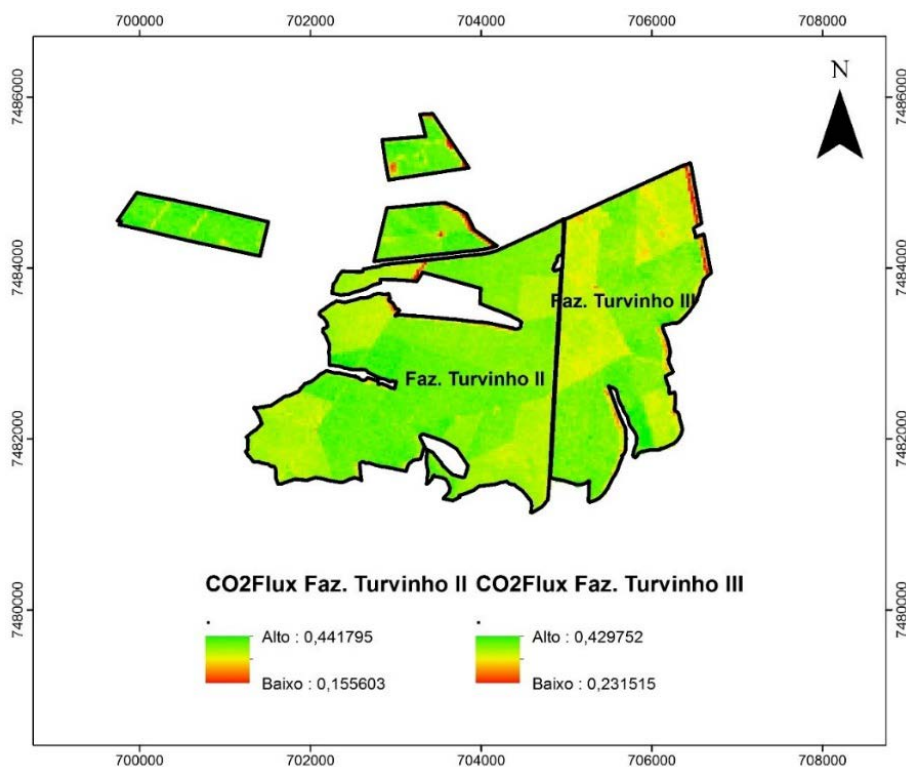


Figura 8 - CO₂Flux do período de abril de 2016. Faz. Turvinho II e III.

No caso das duas fazendas os valores apurados também são justificados pela idade em que os talhões se encontravam, o valor mais alto da Fazenda Turvinho II está vinculado a idade média dos pontos amostrais que foi de 6,33 anos

de idade conforme a cena selecionada, de acordo com a tabela 7, seu ponto mais baixo descreve um início de perda vegetativa presente em indivíduos que passam de 5 anos de idade (Rahman et al., 2000).

Tabela 8 - Escala da variação espectral CO₂Flux abril de 2016. Faz. Turvinho II e III

Escala	Faz. Turvinho II	Faz. Turvinho III
Alto	0,441795	0,429752
Baixo	0,155603	0,231515
Total	0,286192	0,198237

Os valores de CO₂Flux na Fazenda Turvinho III totalizados na amostra com menor valor de diferença de escala entre os pontos, correspondem a uma área de 127,42 ha com indivíduos em idade de 5,18 anos que em

comparação com a Fazenda Turvinho II que detém atributos do IF inferiores, mas com número de amostras maior devido a área total resultado apresentado respectivamente na tabela 9 a seguir:

Tabela 9 - Valores amostrais dados de IF- 2016 para Faz. Turvinho II e III para cena abril de 2016

Fazenda	Idade IF Cena Abril de 2016	ÁREA (ha)	Nº de amostra	Média de Fustes ha	DAP médio (m)	Altura média (m)	Média de Altura Dominante (m)	Média de Área Basal (m ² ha ⁻¹)	Média de CO ₂ Flux
TURVINHO II	6,33	430,29	55,00	1.128,71	0,16	25,46	27,98	23,60	0,3786
TURVINHO III	5,18	127,42	14,00	1.227,67	0,17	27,25	31,15	26,32	0,3583

CO₂Flux – agosto de 2016 – todas as fazendas

As escalas dos graus de eficiências do sequestro de CO₂ na amostra considerando a cena de agosto de 2016, com idade média 5,24 anos disposta na figura 9 e com detalhamento na tabela 10 dos valores de escala da variação espectral do CO₂Flux das fazendas no período.

carbono na amostra oscilaram na média de 0,413927, com destaque para a Fazenda Turvinho II, que despontou com 0,451463. O que difere a Fazenda Turvinho II das demais em relação a esse valor pode ser justificado pela sua extensão de área, que é a maior da amostra e com a maior área basal presente (Landsberg, 1986) apresentado na tabela 11.

Os valores com maior escala de sequestro de

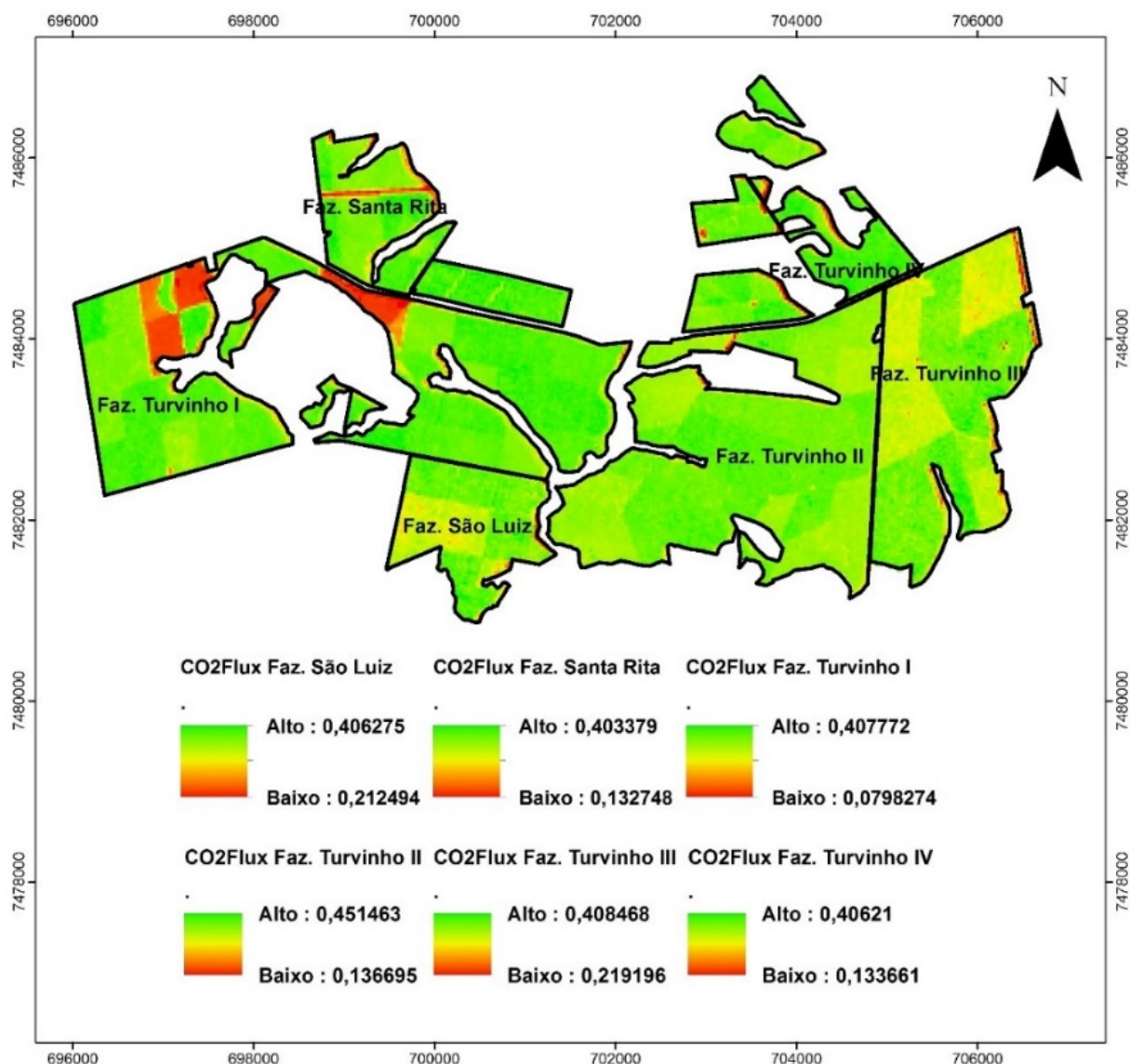


Figura 9 - CO₂Flux do período de agosto de 2016 para todas as fazendas.

Tabela 10 - Escala da variação espectral CO₂Flux agosto de 2016 para todas as fazendas.

Escala	Faz. São Luiz	Faz. Santa Rita	Faz. Turvinho I	Faz. Turvinho II	Faz. Turvinho III	Faz. Turvinho IV
Alto	0,406275	0,403379	0,407772	0,451463	0,408468	0,40621
Baixo	0,212494	0,132748	0,0798274	0,136695	0,219196	0,133661
Total	0,193781	0,270631	0,3279446	0,314768	0,189272	0,272549

Tabela 11 - Valores amostrais dados de IF- 2016 para todas as fazendas para cena de agosto de 2016.

Fazenda	Idade IF Cena Ago. 2016	Área (ha)	Nº amostra	Média Fustes (há)	DAP médio (m)	Altura média (m)	Média Altura Domin. (m)	Média Área Basal (m ² ha ⁻¹)	Média de CO ₂ Flux
SANTA RITA	5,53	148,45	23	1.093	0,16	23,95	26,81	21,42	0,3564
SÃO LUIZ	5,65	188,17	25	1.114	0,16	23,74	26,66	21,80	0,3617
TURVINHO I	6,27	222,31	29	1.118	0,16	25,11	27,86	22,14	0,3637
TURVINHO II	3,73	269,98	31	1.160	0,17	26,46	29,37	26,11	0,3901
TURVINHO III	5,24	114,27	12	1.207	0,17	27,52	30,96	25,62	0,3580
TURVINHO IV	5,04	73,76	9	1.039	0,16	26,81	30,35	21,90	0,3784

CO₂Flux – setembro de 2017 – Fazendas Turvinho (I, II, III e IV)

Na figura 10 é possível detectar os valores por escala de nível onde o sequestro de carbono obteve maior eficiência na cena (em tom verde)

nos pontos amostrais dos talhões das fazendas Turvinho I, II, III e IV pela data do IF de agosto de 2016. Completando a análise na tabela 12, os valores de diferença de escala são detalhados.

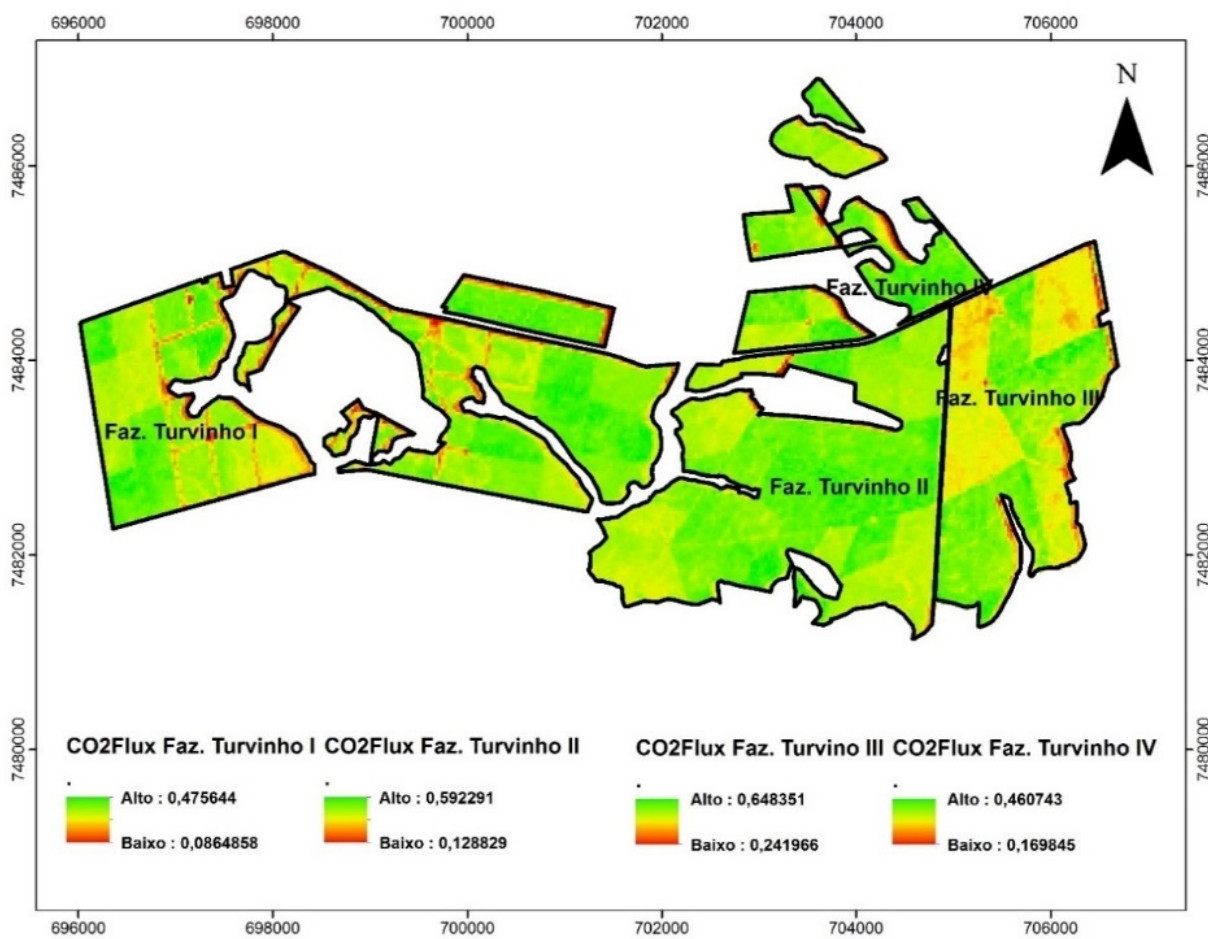


Figura 10 - CO₂Flux do período de setembro de 2017. Faz. Turvinho (I, II, III e IV).

Tabela 12 - Escala variação espectral CO₂Flux set. 2017. Faz. Turvinho (I, II, III e IV).

Escala	Faz. Turvinho I	Faz. Turvinho II	Faz. Turvinho III	Faz. Turvinho IV
Alto	0,475644	0,592291	0,648351	0,460743
Baixo	0,0864858	0,128829	0,241966	0,169845
Total	0,3891582	0,463462	0,406385	0,290898

Em relação as escalas entre os pontos com maior eficiência de sequestro de carbono (tom verde) e os pontos com menor escala (tom vermelho) a Fazenda Turvinho III, obteve o maior ponto da amostra em sequestro de CO₂ em relação as demais, a idade média que os indivíduos distribuídos em 12 pontos amostrais e com 1,207 fustes por ha da Fazenda Turvinho III foi de 5,24 anos, apurados no IF disposto na tabela 11.

O dado com menor eficiência apurado pelo CO₂Flux da amostra está presente junto a Fazenda Turvinho I, correlacionando as infor-

mações contidas na tabela 13 evidencia que nos 29 pontos amostrais, os indivíduos arbóreos estavam com 6,27 anos de idade, em estágio de amadurecimento e em processo de redução vegetativo foliar, o que reduz os valores de vigor da vegetação apurados pelo NDVI e refletindo diretamente ao valor de escala (Polonio, 2015) apurado de 0,08664858. Essa situação ocorre da mesma forma com a Fazenda Turvinho II, porém de forma contrária, pois os 31 pontos amostrais apurados pelo IF de dezembro de 2016 estavam com 3,73 anos de idade média. Um detalhe se faz necessário discriminar, os valores de área basal

são superiores aos demais devido ao material genético dos indivíduos.

Tabela 13. Valores amostrais dados de IF- 2016 para Faz. Turv. (I, II, III e IV) para cena set. 2017.

Fazenda	Idade IF Cena Ago. 2016	Área (ha)	Nº amostra	Média Fustes (ha)	DAP médio (m)	Altura média (m)	Média Altura Domin.(m)	Média Área Basal (m ² ha ⁻¹)	Média CO ₂ Flux
TURVINHO I	6,27	222,31	29	1.118	0,16	25,11	27,86	22,14	0,3637
TURVINHO II	3,73	269,98	31	1.160	0,17	26,46	29,37	26,11	0,3901
TURVINHO III	5,24	114,27	12	1.207	0,17	27,52	30,96	25,62	0,3580
TURVINHO IV	5,04	73,76	9	1.039	0,16	26,81	30,35	21,90	0,3784

CONCLUSÃO

A aplicação de sensoriamento remoto via índices como o NDVI e CO₂Flux contribuiu fortemente para que tecnologias sejam empregadas e resultem no desenvolvimento de melhoria das técnicas de mensuração e estimativa de biomassa e carbono em florestas plantadas. O aprimoramento de rotinas e técnicas para tal propósito agrega condições positivas na compreensão espaço temporal e da própria dinâmica ecossistêmica do carbono.

Para o setor de floresta plantada o estudo da paisagem por meio de imagens espectrais, lhe permite mensurar valores econômicos quanto ambientais e lhe assegura adotar práticas sustentáveis em seus fluxos de produção e de capital. Na amostra foi possível estimar os valores de

biomassa e carbono de forma acurada e com aplicação científica, permitindo dessa forma maximizar os dados por meio de ferramentas geotecnológicas de alto impacto na gestão dos recursos naturais florestais.

Os valores de vigor e eficiência do sequestro do carbono permite que o manejo florestal ocorra de forma sustentável, a dinâmica adotada na metodologia oriunda do sensoriamento remoto agrega valor intangível ao cenário da silvicultura o que lhe dá condições para que projetos como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) Florestal sejam desenvolvidos e investimentos possam ser angariados em projetos no mercado do carbono.

REFERÊNCIAS

- ABRAF – **Anuário Estatístico da ABRAF** – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Ano base 2008. Brasília/DF. 2009 120 p. ISSN: 1980-8550. Disp. em: <https://www.ipef.br/publicacoes/acervohistorico/informacoestecnicas/estatisticas/anuario-ABRAF-2009-EN.pdf> Acesso em: 09 nov. 2023.
- ALMEIDA, A.Q.; RIBEIRO, A.; DELGADO, R.C.; RODY, Y.P.; OLIVEIRA, A.S.; LEITE, F.P. Índice de área foliar de Eucalyptus estimado por índices de vegetação utilizando imagens TM – Landsat 5. **Floresta e Ambiente**, p. 368-376, 2015. Disp. em: <http://www.scielo.br/pdf/foram/v22n3/2179-8087-floram-22-3-368.pdf> Acesso em: 20 set. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.103414>
- ANDRADE, D.D. Estimativas de carbono na cobertura vegetal da APA Fernão Dias (MG) por meio de dados espectrais e de campo. **Caderno de Estudos Geoambientais – CADEGEO**, v. 05, n. 01, p. 05-16, 2015. Disp. em: <http://www.cadegeo.uff.br/index.php/cadegeo/article/view/22> Acesso em: 24 dez. 2018.
- ANTUNES, M.A.H.; DEBIASI, P.; COSTA, A.R. GLERIANI, J.M. Correção Atmosférica de Imagens Alos/Avnir-2 Utilizando o Modelo 6S. Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto ISSN: 1808-0936. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 4: p. 531-539, 2012. Disp. em: <https://seer.ufu.br/index.php/revista-brasileiracartografia/article/view/44818> DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv64n5-44818> Acesso em: 09 nov. 2023.
- BACHA, C.J.C. Análise da evolução do reflorestamento no Brasil. **Revista de economia agrícola**, v. 55, n. 2, p. 5-24, 2008. Disp. em: <http://www.iea.sp.gov.br/ftp/iea/publicar/REA2-1208a1.pdf> Acesso em: 9 nov. 2023.
- BAPTISTA, G.M.M. Validação da Modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados Aviris e Hyperion. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2003, p. 1037-1044. Disp. em: http://marte.sid.inpe.br/col/ltd.inpe.br/sbsr/2002/09.07.21.45/doc/10_002.pdf Acesso em: 09 nov. 2023.
- BAPTISTA, G.M.M. Mapeamento do Sequestro de Carbono e de Domos Urbanos de CO₂ em Ambientes Tropicais, por meio de Sensoriamento Remoto Hiperespectral. X ed. Rio Claro: **Geografia**, v. 29, n. 2, p. 189 – 202, 2004. Disp. em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/853> Acesso em 09 nov. 2023.
- BARBA, J.; BRADFORD, M.A.; BREWER, P.E.; BRUHN, D.; COVEY, K.; HAREN, J.V.; MEGONIGAL, J.P.; MIKKELSEN, T.N.; PANGALA, S.R.; PIHLATIE, M.; POULTER, B.; RIVAS-UBACH, A.; SCHADT, C.W.; TERAZAWA, K.; WARNER, D.L; ZHANG, Z.; VARGAS, R. Emissões de metano a partir de galhos de árvores: uma nova fronteira no ciclo global de carbono. **Novo Phytologist**, 2018. Disp. em: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/nph.15582> DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.15582>. Acesso em: 05 jan. 2019.
- BERRA, E.F.; BRANDELERO, C.; PEREIRA, R.S.; SEBEM, E.; GOERGEN, L.C.G.; BENEDETTI, A.C.P.; LIPPERT, D.B. Estimativa do volume total de madeira em espécies de eucalipto a partir de imagens de satélite Landsat. **Ciência Florestal**. v. 22, n. 4. 2012. ISSN: 1980-5098. Disp. em: <https://periodicos.ufsm.br/index.php/cienciaflorestal/article/view/7566>. DOI: <http://dx.doi.org/10.5902/198050987566> Acesso em: 13 mar. 2019.
- CASSOL, H.L. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono em um fragmento de floresta ombrófila mista com uso de dados ópticos de sensores remotos**. IGEO/UFRGS, 143 p.,

2013. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto de Geociências Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disp. em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/79773> Acesso em 9 nov. 2023.
- CIB – Conselho de Informações sobre Biotecnologia, **Eucalipto oportunidade para um desenvolvimento sustentável**. São Paulo: CIB, 2008. Disp. em: http://www.biologia.seed.pr.gov.br/arquivos/File/biotecnologia/eucalipto_junho_2008.pdf Acesso em: 09 nov. 2023.
- CLANCY, M.A. **Forest soil carbon stocks and life cycle assessment of short rotation forestry**. 2018. Ireland. Thesi submitted to the University of Limerick. Dep Philosophy., Disp. em: <https://hdl.handle.net/10344/7577> Acesso em: 9 nov. 2023.
- CONGEDO, L. **Semi-Automatic Classification Plugin Documentation**. Release 6.0.1.1. Technical Report. September 2012. Sapeinza University of Rome. Disp. em: https://www.researchgate.net/publication/307593091_Semi-Automatic_Classification_Plugin_Documentation_Release_6011 Acesso em: 14 Mar. 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.29474.02242/1
- GOUDIE, A. S. **Human impact on the natural environment**. John Wiley & Sons, 2018. LCCN 2018008627, LCCN 2018009296, ISBN 978119403930, ISBN 978119403739, ISBN 978119403555 (pbk: alk paper).
- GUERREIRO, S.F.; SARTORI, A.A.C.; KASPARY, R.M.; MARTINS, M.S.; SANCHEZ, C.C.; MARCHIORI, L.M. **Analysis of the introduction of geotechnologies for the valuation of forest environmental services and the integration of clean development mechanism for a sustainable economy. Características práticas e teóricas da geomática** [recurso eletrônico] Org. Ingrid Aparecida Gomes. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019 Disp. em: <https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/03/E-book-Characterísticas-Práticas-e-Teóricas-da-Geomática.pdf> Acesso em: 30 mar. 2019. ISBN 978-85-7247-211-1 DOI 10.22533/at.ed.111192803
- GUERREIRO, S.F. DA CONCEIÇÃO SARTORI, A.A., BARBOSA, F.T., KASPARY, R.M., MARTINS, M.S.; MARCHIORI, L.M. Estimativa de biomassa e carbono em floresta plantada adotando o modelo de Schumacher & Hall: estudo de caso. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. Supl. 2, p. 1-9, 2021. Disp. em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/8818> DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14Supl.2.e8818> Acesso em: 09 nov. 2023.
- HAYDE, E. & SEMMLER, W. **The Dynamics of Negative Carbon Emissions: The Case of Forestry** (February 16, 2018). Henry George School of Social Science: New Voices in Economics. 25 p. Disp. em: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3153017. DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3153017>. Acesso em: 17 jun. 2018
- LANDSBERG, J.J. **Physiological ecology of forest production. Melbourne: CSIRO**, Division of Forest Research, 1986. Disp. em: <https://www.elsevier.com/books/physiological-ecology-of-forest-production/landsberg/978-0-12-374460-9> Acesso em: 26 ago. 2018. ISBN: 9780080922546
- MANZATO, C.L. **Estimativa de biomassa e estoque de carbono na cultura do eucalipto por meio de sensoriamento remoto**. 2018, 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade do Sagrado Coração, Bauru, 2018. Disp. em: <https://tede2.usc.br:8443/handle/tede/387> Acesso em: 24 out. 2018.
- MARKHAM, B.E & BARKER, J.L. Propriedades radiométricas de dados MSS de satélites terrestres processados pelos EUA. **Remote Sensing of Environment**, v. 22, n. 1, p. 39-71, 1986.
- MELO, E.T.; SALES, M.C.L.; OLIVEIRA, J.G.B. Aplicação do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para análise da degradação ambiental da microbacia hidrográfica do Riacho dos Cavalos, Cratêus-CE. **RA'E GA O espaço geográfico em análise**. Curitiba, Departamento de Geografia, UFPR, p. 520-533, 2011. Disp. em: <https://revistas.ufpr.br/raega/article/viewFile/24919/16717> Acesso em: 03 dez. 2018. ISSN: 2177-2738.
- MENESES, P.R. & ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UnB, p. 01-33, 2012.
- MOLION, L.C.B. Aquecimento global: uma visão crítica. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, 2008. Disp. em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25404> Acesso em: 12 dez. 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v3i0.25404>
- MOREIRA, M.A.; RUDORFF, B.F.T.; FELÍCIO, J.C.; FREITAS, J.G.; TARGA, M.S. Variação espectral e eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa em ensaio com genótipos de trigo. **Bragantia**, v. 64, n. 3, p. 331-338, 2005. Disp. em: <http://www.scielo.br/pdf/%0D/brag/v64n3/26426.pdf> Acesso em: 10 mar. 2019.
- NASCIMENTO, R. M. **Abordagem de floresta de precisão para qualidade silvicultural em plantio comercial de Eucalyptus sp.** 2017. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Agricultura de Precisão. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – RS. Disp. em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/11361> Acesso em: 24 jun. 2018.
- PAN, Y.; BIRDSEY, R.A.; FANG, J.F.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P.E.; KURZ, W.A.; PHILLIPS, O.L.; SHVIDENKO, A.; LEWIS, S.L.; CANADELL, J.G.; CIAIS, P.; JACKSON, R.B.; PACALA, S.W.; MCGUIRE, A.D.; PIAO, S.; RAUTIAINEN, A.; SITCH, S.; HAYES, D. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. **Science** 19, v. 333, Issue 6045, p. 988-993, 2011. Disp. em: <http://science.sciencemag.org/content/333/6045/988> Acesso em: 4 fev. 2019. DOI: 10.1126/science.1201609
- POLONIO, V.D. **Vegetation indices in the measurement of carbon stock in areas with sugar cane**. 2015. Dissertação (Mestrado). Agronomia (Energia na Agricultura) - FCA. Disp. em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/132026> Acesso em: 28 fev. 2019.
- PONZONI, F.J. & SHIMABUKURO, Y.E. Sensoriamento remoto no estudo da vegetação. 2010 ed. São Jose dos Campos: **Parotense**, 2010. 128 p. Disp. em: http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.11/doc/CAP8_FJPNozoni.pdf Acesso em: 30 mar. 2019.
- RAHMAN, A.F. GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO2 flux of boreal forest using narrow-band índices from AVIRIS imagery. In: AVIRSI Workshop. Pasadena, 2000. **Proceedings..JPL/NASA**, 2 University of California, Santa Barbara, Geography Department. Disp. em: https://aviris.jpl.nasa.gov/proceedings/workshops/00_docs/Rahman_web.pdf Acesso em: 05 mar. 2018.
- SCHLAMADINGER, B. & MARLAND, G. The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. **Biomass and Bioenergy**, v. 10, Issues 5–6, p. 275-300, 1996. Disp. em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0961953495001131> Acesso em: 3 mar. 2018. DOI: [http://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00113-1](http://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00113-1)
- SCHOU, J.; SCHERRER, P.H.; BUSHR, R.I.; WACHTER, R.; COUVIDAT, S.; RABELLO-SOARES, M.C.; BOGART, R.S.; HOEKSEMA, J.T.; LIU, Y.; DUVALL JR, T.L.; AKIN, D.J.; ALLARD, B.A.; MILES, J.W.; RAIRDEN, R.; SHINE, R.A.; TARBELL, T.D.; TITLE, A.M.; WOLFSON, C.J.; ELMORE, F.; NORTON, A.A.; TOMCZYK, S. Design and ground calibration of the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) instrument on the Solar Dynamics Observatory (SDO). **Solar Physics**, v. 275, n. 1-2, p. 229-259, 2012. Disp. em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11207-011-9842-2> Acesso em: 5 jun. 2018. DOI: 10.1007/s11207-011-9842-2
- SCHROEDER, P. Carbon storage potential of short rotation tropical tree plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 50, n. 3, p. I-41, 1992. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam 31 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037811279290312W> Acesso em: 15 mar. 2017. DOI: [http://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90312-W](http://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90312-W)

THORNE, K.; MARKHARN, B.; BARKER, J.; SLATER, P.; BIGGAR, S. Radiometric calibration of Landsat. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 63, n. 7, p. 853-858, 1997. Disp. em: <https://pdfs.semanticscholar.org/18c0/c053384ecd3be59efb33d5a21e7652d76.pdf> Acesso em: 12 jun. 2018.

USGS. **Landsat Missions: Using the USGS Landsat-8 Product**. U.S. Department of the Interior - U.S. Geological Survey – NASA. Site: Acesso em: 09 nov. 2023.

VALE, A.B.; MACHADO, C.C.; PIRES, J. M.M.; VILAR, M.; COSTA, C.B.; NACIF, A.P. (ed.) **Eucaliptocultura no Brasil: Silvicultura, manejo e ambiência**. Viçosa-MG: Embrapa Floresta, 2014, p. 17-35. Disp. em: <http://www.sif.org.br/livro/eucaliptocultura-no-brasil-silvicultura-manejo-e-ambiencia> Acesso em: 30 mai. 2018.

*Submetido em 14 de novembro de 2023
Aceito para publicação em 30 de julho de 2024*