


# Análise temporal de sequestro de carbono na determinação de mudanças ambientais em fragmento de Mata Atlântica Capixaba

## *Temporal analysis of carbon sequestration in determining environmental changes in a fragment of the Capixaba Atlantic Forest*

Adelsom Soares Filho, Universidade Federal da Grande Dourados, Brasil, [adelsomfilho@ufgd.edu.br](mailto:adelsomfilho@ufgd.edu.br)

 <https://orcid.org/0000-0003-0433-5732>

Eberval Marchioro, Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil, [ebervalm@gmail.com](mailto:ebervalm@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0003-0207-6087>

**Resumo:** O desenvolvimento de pesquisas para analisar a dinâmica do carbono atmosférico em remanescentes de Mata Atlântica é essencial tanto em escala local quanto global. O objetivo desta pesquisa é correlacionar os níveis de sequestro de carbono compreendidos no período de 23 anos com o estado de regeneração natural do fragmento de Mata Atlântica da Reserva Biológica de Duas Bocas, na região metropolitana da Grande Vitória, no Espírito Santo, Brasil. O método adotado foi a modelagem do Índice de Sequestro Florestal de Carbono (CO<sub>2</sub>flux), um estimador da eficiência na capacidade de concentração de carbono sequestrado pela vegetação, proposto através da integralização do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) com o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI). Na elaboração dos índices espectrais, foram utilizados dois recortes de imagens Landsat, sendo uma do sensor TM (Landsat-5), de 03 de outubro de 2000 e outra do sensor OLI (Landsat-8), datada de 24 de setembro de 2023. Os resultados demonstraram que a vegetação local sofreu mudanças significativas nos fluxos de CO<sub>2</sub> no período investigado, pois os valores de sequestro de carbono em 2023 apresentaram aumento de 32% em relação ao ano 2000. Por fim, tais aspectos verificados para a Mata Atlântica capixaba indicaram a necessidade de manutenção e regeneração das florestas para diminuir a emissão dos gases de efeito estufa como o CO<sub>2</sub>.

**Palavras-Chave:** CO<sub>2</sub>flux; Fluxos de Carbono; Sensoriamento Remoto multiespectral.

**Abstract:** Research aimed at analyzing the dynamics of atmospheric carbon in Atlantic Forest remnants is essential both locally and globally. The objective of this paper is to correlate the levels of carbon sequestration over a 23-year period with the natural regeneration state of the Atlantic Forest fragment of Duas Bocas Biological Reserve, in the metropolitan region of Grande Vitória, Espírito Santo, Brazil. We adopted the modeling of the Forest Carbon Sequestration Index (CO<sub>2</sub>flux), an estimator of the efficiency of the carbon sequestration capacity of vegetation, proposed through the integration of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) with the Photochemical Reflectance Index (PRI). Two Landsat image cuts were used, one from the TM sensor (Landsat-5), dated October 3, 2000, and the other from the OLI sensor (Landsat-8), dated September 24, 2023, in the elaboration of the spectral indices. The results demonstrate that the local vegetation underwent significant changes in CO<sub>2</sub> fluxes during the period investigated, as the carbon sequestration values in 2023 showed a 32% increase compared to 2000. Finally, such aspects verified for the capixaba Atlantic Forest indicated the need for the maintenance and regeneration of forests, to reduce the emission of greenhouse gases such as CO<sub>2</sub>.

**Keywords:** CO<sub>2</sub>flux; Carbon Fluxes; Multispectral Remote Sensing.

## Introdução

Os ecossistemas florestais exercem uma função importante nas mudanças globais terrestres, pois a sua degradação ou desflorestação contribui para a emissão de carbono na atmosfera, intensificando as mudanças climáticas e ambientais (Frolking *et al.*, 2009; Hansen *et al.*, 2013).

Essas transformações decorrem das alterações dos sistemas florestais e do uso da terra, tais como a substituição de floresta nativa, queimadas, entre outros, e o consumo de combustíveis fósseis que corroboram as elevadas concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Essa concentração é resultado das emissões de gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2023).

Dentre os efeitos associados às mudanças climáticas, destaca-se a elevação da temperatura, que influencia diretamente o processo fotossintético das plantas (Wang *et al.*, 2018) e é considerada uma das principais ameaças à biodiversidade e aos ecossistemas em escala global (Hughes, 2000; Hansen *et al.*, 2001; Travis, 2003; Parmesan & Yohe, 2003).

Em resposta a essa situação, tanto cientistas quanto responsáveis pela elaboração de políticas públicas têm intensificado esforços na procura por estratégias que possam diminuir as emissões desses gases (National Research Council, 2010; Keskitalo, 2012).

Nesse contexto, as discussões sobre a redução das emissões de CO<sub>2</sub> e o sequestro de carbono atmosférico evidenciam um importante serviço ambiental das florestas, que deve ser considerado ao longo da preservação e restauração dos ambientes (Ninan & Inoue, 2013).

No Brasil, esse serviço ambiental é assegurado pela vegetação natural de seus diferentes biomas, sobretudo em áreas de preservação ambiental, tais como as unidades de conservação e terras indígenas (Brandão & Barreto, 2016). Nesse sentido, é considerado um país de destaque no contexto da conservação ambiental, abrigando aproximadamente 40% das florestas tropicais remanescentes (Peres, 2005), 50% das maiores reservas de biosfera (Brazil, 2010; Protected Planet, 2024) e a maior planície alagável do mundo, o Pantanal. Além disso, possui dois grandes *hotspots* de biodiversidade global: a Mata Atlântica e o Cerrado (Myers *et al.*, 2000).

Em relação à Mata Atlântica, em especial, possui reduzida extensão em comparação à sua área original e tem sofrido impactos ambientais significativos oriundos das mudanças de uso da terra ao longo do tempo histórico. Em virtude da intensa ocupação antrópica ocorrida desde o período colonial até os dias atuais, principalmente com os aglomerados urbanos, evidencia-se a necessidade de investigações mais detalhadas sobre a dinâmica desse bioma e sobre o papel desempenhado no sequestro de carbono.

Contudo, desenvolver estudos em áreas florestais é tarefa hercúlea, especialmente quando se utilizam métodos de alto custo financeiro e que necessitam cobrir grandes áreas inacessíveis. Nesse sentido, o sensoriamento remoto possui papel primordial

na mitigação de tais dificuldades, com a aplicação dos índices de vegetação, derivados de imagens orbitais.

Esse recurso metodológico possibilita análises menos invasivas, mais prática e economicamente viáveis, pois permitem monitorar e quantificar a distribuição espacial da biomassa vegetal e de sua contribuição no sequestro de carbono atmosférico.

Entre as metodologias disponíveis, destaca-se o CO<sub>2</sub>flux (Rahman *et al.*, 2001), Índice de Sequestro Florestal de Carbono, fundamentado na integração de índices espectrais, como o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse *et al.*, 1974) e o *Photochemical Reflectance Index* (PRI) (Gamon *et al.*, 1997), reconhecidos pelo potencial na modelagem do sequestro e fluxo de carbono atmosférico.

Embora diversos estudos tenham explorado a estimativa de sequestro de carbono utilizando o método CO<sub>2</sub>flux (Lage *et al.*, 2015; Silva; Baptista, 2015; Folharini & Oliveira, 2017; Silva & dos Anjos, 2021; Soares Filho *et al.*, 2019; Silva & Faria, 2023; Santos *et al.*, 2023), ainda são limitadas as aplicações que utilizam imagens multiespectrais, como as fornecidas pelo sistema *Land Remote Sensing Satellite* (Landsat), para a estimação de mudanças ambientais em unidades de conservação.

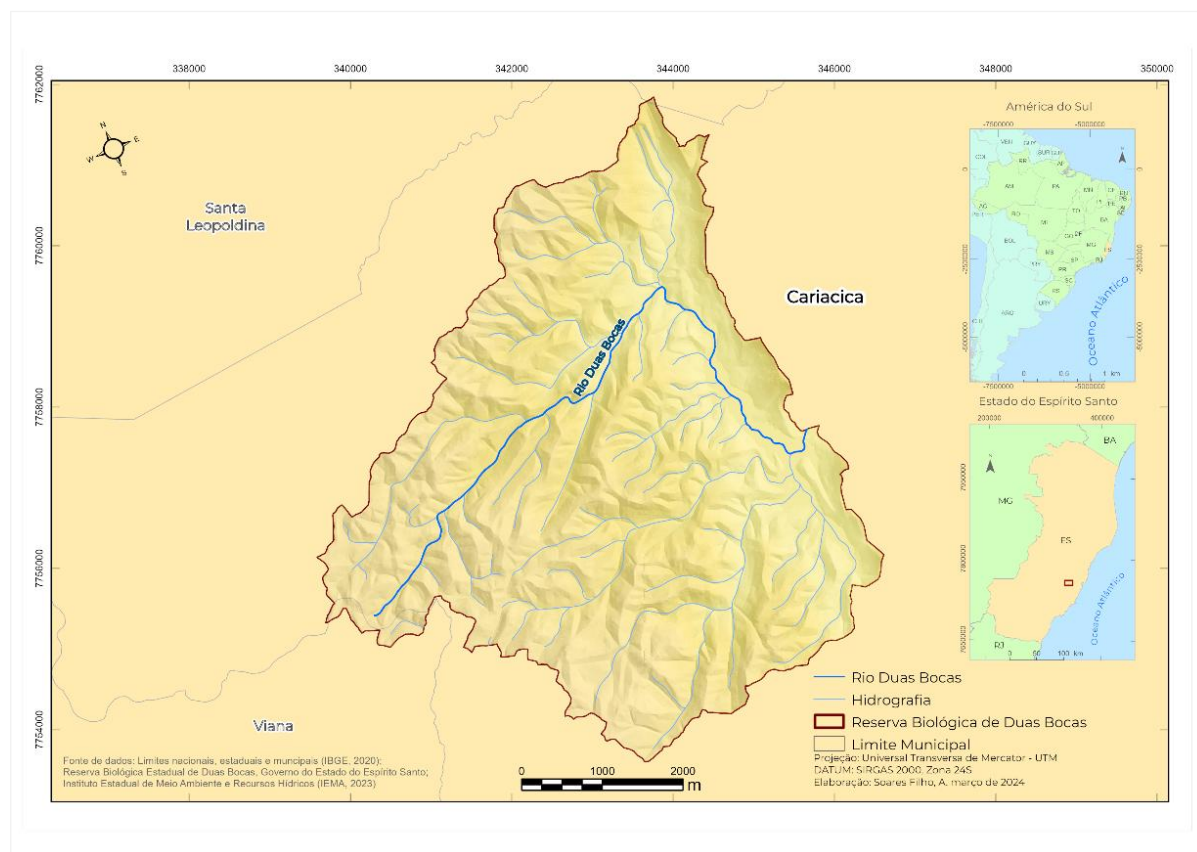
Diante dessas lacunas, a presente pesquisa tem como área de estudo a Reserva Biológica de Duas Bocas (ReBio), um importante fragmento florestal de Mata Atlântica que carece de monitoramentos específicos acerca das mudanças decorrentes de processos naturais ou antrópicos.

O objetivo central é correlacionar os níveis de sequestro de carbono, ao longo de um período de 23 anos, com os padrões de regeneração natural observados nesse fragmento de Mata Atlântica. A investigação pretende fornecer bases científicas para compreensão da dinâmica ecológica desse sistema florestal, subsidiando estratégias para a conservação da biodiversidade.

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

A área de estudo (Figura 1) corresponde à Reserva Biológica Estadual de Duas Bocas, localizada entre as longitudes 40°32'17.837" e 40°27'57.654" e latitudes 20°14'0.560" e 20°18'39.812". A unidade possui área territorial aproximada de 3 mil hectares, distribuídos majoritariamente no município de Cariacica (99,15%), com pequenas parcelas em Viana (0,83%) e Santa Leopoldina (0,017%), integrando a Região Metropolitana da Grande Vitória, no estado do Espírito Santo, Brasil.

Criada em 1965 como Reserva Florestal (Lei 2.095, de 12 de janeiro de 1965), a área foi transformada em Reserva Biológica de Duas Bocas em 1991 (Lei Estadual 4.503/91). Posteriormente em 2007, foi renomeada como Reserva Biológica Paulo Fraga Rodrigues (Lei Estadual 8.488, de 19 de abril de 2007). Contudo, optamos por utilizar a denominação tradicional, Reserva Biológica de Duas Bocas, conforme permanece amplamente reconhecida pela comunidade capixaba.



**Figura 1:** Localização da ReBio de Duas Bocas.

**Fonte:** Os autores (2024).

Situada próxima ao litoral do Espírito Santo, a ReBio insere-se no domínio da Floresta Ombrófila Densa (Figura 2 - A/B), sendo subdividida em Floresta Ombrófila Densa (FOD), Submontana (de 50m a 500m) e Montana (de 500m a 1500m) (IBGE, 2012). Nas poções de maior altitude observam-se as áreas mais conservadas com baixa influência antrópica ao longo do tempo (Merçon, Pereira & Thomaz, 2012) (Figura 2 - C/D).

Do ponto de vista climático, a área insere-se no domínio de Zona Climática Quente, com temperaturas elevadas durante a maior parte do ano e redução moderada no inverno. A Temperatura Média do Mês Mais Frio (TMMM) oscila entre 15 °C e 22,4 °C, conforme Oliveira (2023).

A precipitação anual atinge valores próximos de 1.587 mm, influenciada pela morfologia dos Patamares Escalonados do Sul Capixaba, intensificando o efeito orográfico e elevando os totais pluviométricos, especialmente nas maiores altitudes (Lopez, 2016).

Com relação à topografia da unidade, é assinalada por intensa variação altimétrica, entre 174 m e 800 m, inserindo-se no domínio geomorfológico da Faixa de Dobramentos Remobilizados. Pertencente à região dos Planaltos da Mantiqueira Setentrional, em Unidade dos Patamares Escalonados do Sul Capixaba, apresenta um Modelado de Dissecção Diferencial, marcado por controle estrutural.





**Figura 2:** Exemplos do fragmento de Mata Atlântica no interior da ReBio de Duas Bocas (ES): (A)- Reservatório de Duas Bocas; (B)- Rio Duas Bocas; (C/D)- Floresta de Mata Atlântica.

**Fonte:** Os autores (2024).

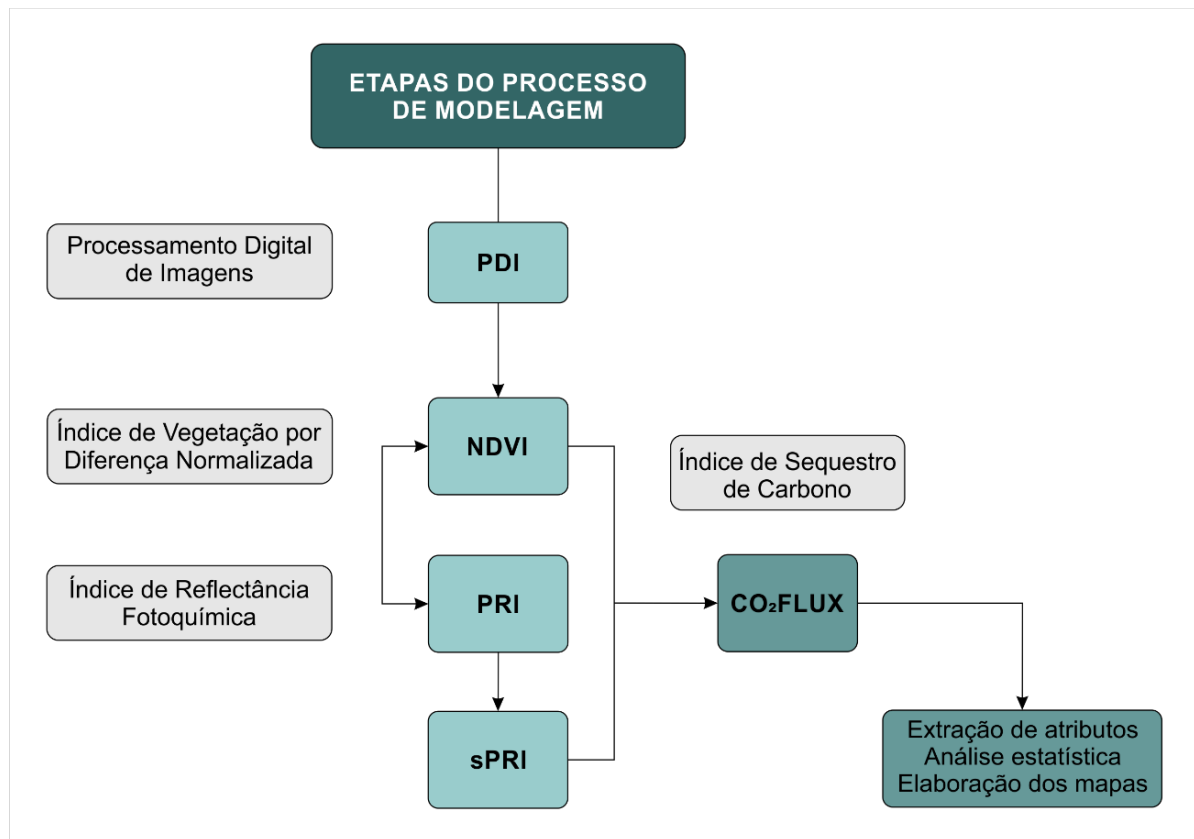
No que se refere ao arcabouço geológico proposto pelo CPRM (2012), a ReBio é sustentada, em sua maior área, por rochas do Proterozoico, datadas do Neoproterozoico, há 631 milhões de anos. A principal unidade geológica dessa era compreende gnaisses, migmatitos e quartzitos, pertencentes ao Complexo Nova Venécia. Em menor proporção, ocorrem o Ortognaisse Santa Tereza, de 589 milhões de anos, e os granitos porfíricos da Unidade Aribiri, datados do Paleozoico (cerca de 500 milhões de anos).

Quanto aos solos, condizem com diversidade geológica e topográfica da região, sendo classificados em três unidades: Latossolos Amarelos, presentes na porção oeste, em topografia elevada, com altitude média de 634 metros; Cambissolos, predominantes na área central, em altitude média de 432 metros; e os Neossolos Litólicos, localizados no setor leste, em relevo mais baixo, em torno de 260 metros (Cunha *et al.*, 2016).

Além da relevância ecológica, a ReBio possui função importante na conservação dos recursos hídricos da região. Nela encontram-se numerosas cabeceiras de drenagem que abastecem o reservatório de Duas Bocas (Figura 2 - A/B), responsável atualmente por cerca de 15% do consumo de água do município de Cariacica (André, 2012).

## 2. Fundamentação metodológica e procedimentos de pesquisa

A presente pesquisa adotou o método fundamentado no Índice de Sequestro de Carbono (CO<sub>2</sub>flux) para estimar a dinâmica do carbono atmosférico na área florestal da ReBio. Esse procedimento foi viabilizado por meio de uso de técnicas de sensoriamento remoto, permitindo a integração de variáveis biofísicas em escala espacial contínua, conforme demonstrado na figura 3 (Rahman *et al.*, 2001; Baptista, 2003).



**Figura 3:** Procedimentos do processamento das imagens Landsat-5/8 para elaboração do Índice de Sequestro de Carbono (CO<sub>2</sub>flux).

**Fonte:** Os autores (2024).

### 2.1. Aquisição das Imagens de Sensoriamento Remoto

Para este estudo foram utilizadas imagens dos sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Operational Land Imager* (OLI), presentes na série de satélites Landsat 5 e 8, abrangendo dois períodos distintos. As cenas, no formato ortorretificado, foram

obtidas junto ao site da *United States Geological Survey* (USGS), atestando maior precisão geométrica.

As imagens empregadas possuem resolução espacial de 30 metros, o que possibilitou a elaboração de composições coloridas de bandas, favorecendo a interpretação visual da cobertura vegetal da ReBio.

Foram priorizadas cenas com baixo percentual de cobertura de nuvens, adquiridas no início do período chuvoso na região, com intuito de reduzir as interferências atmosféricas e maximizar a qualidade das análises.

Dessa forma, a primeira cena utilizada corresponde ao Landsat-5 (TM), órbita ponto 215-74, data de aquisição em 03 de outubro de 2000, data coincidente com a reclassificação da área de estudo de Reserva Florestal para Reserva Biológica, marco temporal que serviu como referência comparativa para a investigação. Enquanto a segunda cena refere-se ao Landsat-8 (OLI), da órbita ponto 216-74, adquirida em 24 de setembro de 2023, correspondendo ao estágio atual da ReBio.

## *2.2. Pré-processamento das imagens*

As bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7 das imagens do Landsat-5 (TM) foram submetidas ao algoritmo *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH®), implementado no software *Environment for Visualizing Images* (ENVI®) para conversão dos valores digitais (DN) em reflectância de superfície (Kaufman *et al.*, 1997).

No caso das imagens Landsat-8 (OLI), o pré-processamento foi realizado utilizando o algoritmo *Quick Atmospheric Correction* (QUAC®) (Bernstein *et al.*, 2012), também disponível no software ENVI®. Essa escolha se deu pela eficiência do QUAC® na correção das bandas 2, 3, 4, 5, 6 e 7, assegurando maior consistência radiométrica entre as cenas de 2000 e 2023.

A partir das imagens corrigidas, foram geradas composições coloridas RGB das bandas 7, 4 e 1 (Landsat-5/TM) e das bandas 7, 5 e 2 dos sensores (Landsat-8/OLI), que assessoraram tanto a análise visual quanto a identificação de padrões espectrais da vegetação. Na sequência, foram selecionados seis pontos amostrais para extração de perfis espectrais, os quais foram comparados com os dados da biblioteca espectral da USGS (Kokaly *et al.*, 2017).

## *2.3. Cálculo dos índices espectrais*

O primeiro produto calculado foi o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), para os anos de 2000 e 2023, de acordo com o proposto por Rouse *et al.*, 1974. Segundo Ponzoni *et al.* (2015), o NDVI deve ser utilizado para construir perfis sazonal e temporais das atividades da vegetação, permitindo comparações interanuais na detecção de atividades sazonal e fenológicas, duração do período de crescimento, pico de verde, mudanças fisiológicas das folhas e períodos de

senescência. Os valores do NDVI são escalonados de -1 a 1, quanto mais próximo de 1, maior densidade de biomassa verde.

A normalização foi definida pela Equação 1:

$$NDVI = \frac{IVP - V}{IVP + V},$$

onde: IVP = Infravermelho Próximo (0,84 µm) e V = banda da cor vermelha (0,65 µm).

Em seguida, foi estimado o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) (Gamon *et al.*, 1997), que estima os pigmentos de carotenoides foliares, os quais, por sua vez, indicam a taxa de armazenamento de dióxido de carbono nas folhagens (Rahman *et al.*, 2001; Folharini & Oliveira, 2017). De forma similar ao NDVI, os valores do PRI variam de -1 a 1, sendo que os valores mais próximos de zero indicam maior eficiência fotossintética (Gamon *et al.*, 1997).

Utilizou-se as bandas das cores correspondentes ao azul e ao verde para a obtenção do PRI, em acordo com a Equação 2:

$$PRI = \frac{B - G}{B + G},$$

onde: B = banda do azul (0,486 µm) e G = banda da cor verde (0,569 µm).

Como os valores do PRI podem ser negativos, procedeu-se a sua normalização, conforme apresentado na Equação 3:

$$sPRI = \frac{PRI + 1}{2}$$

Por fim, elaborou-se o Índice de Sequestro de Carbono (CO<sub>2</sub>flux) que expressa a taxa relativa da capacidade fotossintética da vegetação — quanto maior a realização de fotossíntese, maior será a concentração de carbono sequestrado (Rahman *et al.*, 2001; Baptista, 2003; Polonio *et al.*, 2015).

Para a elaboração do CO<sub>2</sub>flux é necessária a integração do NDVI com o sPRI (Rahman *et al.*, 2001), em acordo com a Equação 4:

$$CO_2 \text{ flux} = NDVI * sPRI$$

As equações foram processadas no módulo *Band Math*, do software ENVI®, versão 5.6.3.

Embora o CO<sub>2</sub>flux tenha sido inicialmente desenvolvido para sensores hiperespectrais de alta resolução espectral, sua aplicação com dados do Landsat mostrou resultados consistentes. Santos *et al.* (2023), por exemplo, aplicaram esse índice em áreas do Bioma Caatinga utilizando imagens do Landsat-8/OLI, e quando comparados os valores dos pixels do CO<sub>2</sub>flux correspondentes à localização da torre de dados micrometeorológicos, obtiveram uma correlação significativa (R<sup>2</sup> = 0,81). Este



resultado atesta a alta semelhança entre os dados espectrais das imagens do sensor OLI e os dados medidos pelo sensor instalado na torre micrometeorológica.

Convém observar que para utilizar os valores próprios do índice de CO<sub>2</sub>flux ( $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), seria fundamental a utilização de dados oriundos de uma torre micrometeorológica, o que possibilitaria estabelecer uma regressão entre os valores do fluxo mensurados na torre e os valores de CO<sub>2</sub>flux, como realizado por Silva e Baptista (2015). No caso da ReBio de Duas Bocas, pela ausência desses equipamentos, os resultados de CO<sub>2</sub>flux foram considerados como valores relativos, representando proporcionalidade ao fluxo de sequestro de carbono (Martins & Baptista, 2013).

#### *2.4. Universo Amostral e Aquisição das características espectrais*

Após a elaboração dos índices de vegetação, foram definidos 72 pontos amostrais distribuídos aleatoriamente por meio do algoritmo do software ArcGis Pro. Para cada ponto, extraiu-se o valor espectral dos índices de vegetação diretamente dos pixels correspondentes nas imagens. Os quais fundamentaram a elaboração dos gráficos *boxplot* e das análises estatísticas descritivas (média, mediana, coeficiente de variação) utilizadas na avaliação temporal do comportamento vegetativo.

Os limites político-administrativos do território brasileiro foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022) enquanto o perímetro da Reserva Biológica foi disponibilizado pela Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Governo do Estado do Espírito Santo.

As atividades de análise espacial, elaboração dos produtos cartográficos e seleção dos pontos amostrais foram realizadas no software ArcGis® Pro (versão 3.2.2) e asseguraram a padronização metodológica ao longo das etapas de detecção de mudanças.

Para validação dos resultados obtidos nas imagens, realizou-se trabalho de campo em 3 de novembro de 2023, quando ocorreu a coleta de informações e observações complementares sobre a cobertura vegetal, contribuindo para a interpretação dos padrões espectrais observados.

### **3. Resultados e discussão**

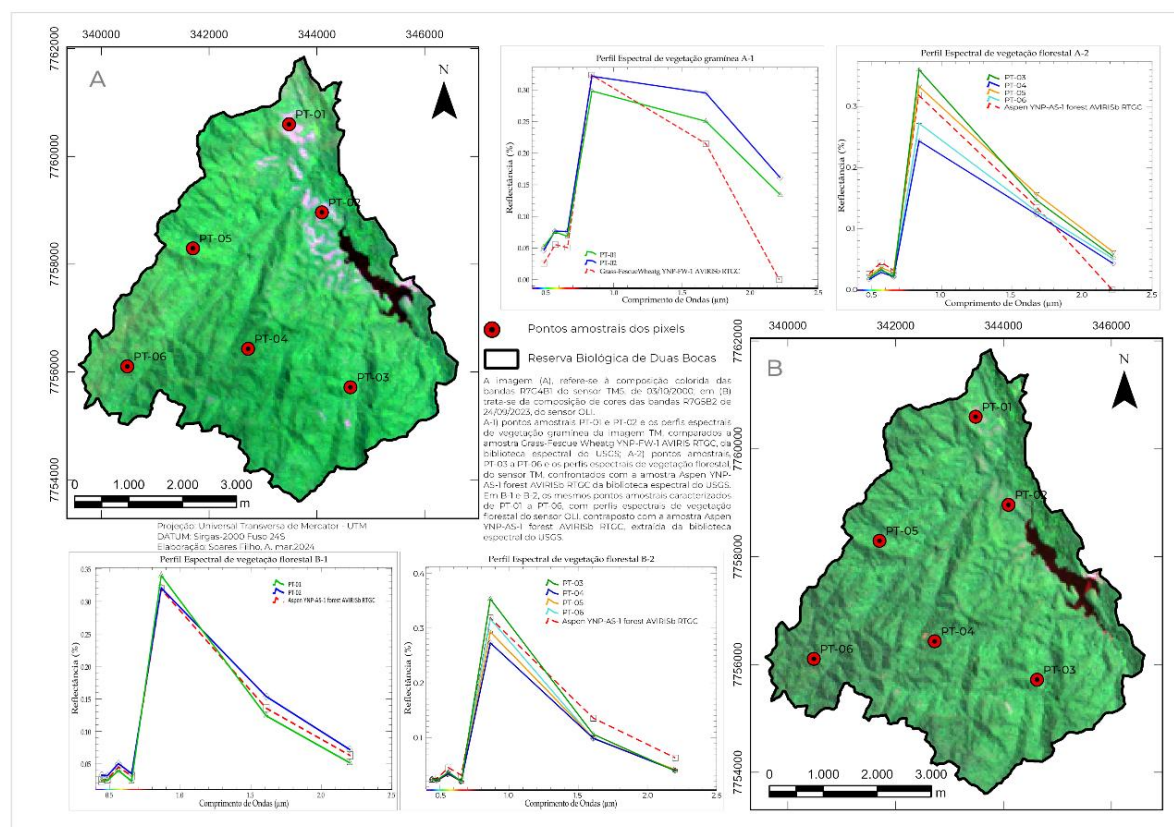
#### *3.1. A Resposta espectral da vegetação na ReBio de Duas Bocas*

A Figura 4 apresenta as composições coloridas das bandas das imagens do sistema Landsat-5 (Figura 4 - A) e Landsat-8 (Figura 4 - B) representativas da cobertura da área de estudo nos diferentes recortes temporais. A partir desses recortes, foram realizadas as análises da resposta espectral da vegetação, com base nos perfis espectrais.

A resposta espectral da vegetação em sensores multiespectrais, comparando os comprimentos de onda do visível ao infravermelho próximo, tem sido utilizada com

resultados satisfatórios em inúmeras aplicações, para estudar o comportamento vegetativo sob condições ambientais adversas (Trentin, 2011; Ribeiro *et al.*, 2019; Barros *et al.*, 2021). Com base nesse referencial, foram analisadas as curvas espectrais extraídas dos mesmos pixels em ambas as imagens.

Na faixa do visível (0,4 e 0,7  $\mu\text{m}$ ), esperavam-se baixos valores de reflectância no azul e ligeiramente mais elevados no verde e redução na banda do vermelho. Entretanto, a comparação entre as curvas espectrais de 2000 (Figura 4 - A-1) e 2023 (Figura 4 - B-1), nessa faixa de comprimento de ondas, revelou diferenças significativas para a mesma localização amostral.



No perfil 4 - A-1, as curvas espectrais de reflectância apresentaram similaridade geral entre si, embora os PT-01 e PT-02 tenham exibido ligeira elevação dos valores na banda do vermelho, em comparação com a amostra da biblioteca espectral do USGS. Essa discrepância pode estar associada a variações estruturais ou fisiológicas da vegetação mapeada no período da imagem TM.

Contudo, a faixa espectral do infravermelho (0,7 a 2,5  $\mu\text{m}$ ), exibiu valores de reflectância mais elevados, indicando possível predomínio de áreas de pastagem ou vegetação arbustiva, de acordo com as características espectrais observadas. As

curvas sugerem que, em 2000, esses pixels continham vegetação menos densa ou de menor atividade fotossintética.

As curvas do sensor OLI (Figura 4 - B-1), correspondentes de 2023, por outro lado, observa-se a similaridade, com comportamento espectral mais homogêneo entre os pontos, com valores elevados tanto no visível quanto no infravermelho próximo (0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$ ). As curvas assumem características de locais com cobertura vegetal mais densa, maior biomassa e atividade fotossintética, tanto na faixa espectral do visível quanto no infravermelho, com linhas sobrepostas, sugerindo provável homogeneidade nas propriedades químicas e estruturais da cobertura vegetal.

Nessas amostras, os altos valores de reflectância no infravermelho, característicos de mistura solo-vegetação, desapareceram. Assim, foram caracterizadas como vegetação florestal, evidenciando um processo de mudança na cobertura vegetal da área, possivelmente de áreas de pastagem para áreas florestadas.

Os demais pontos (PT-03 a PT-06), demonstraram padrões espectrais semelhantes em ambos os períodos. Embora, as imagens Landsat-8 (2023) tenham apresentado valores de reflectância inferiores no infravermelho de ondas curtas (1.5 a 2.5 $\mu\text{m}$ ), em comparação com os valores observados em 2000. Os menores valores de reflectância observados em 2023 podem indicar maior densidade de biomassa, características típicas de vegetação em processo de regeneração.

### *3.2. Detecção de mudanças ambientais com o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)*

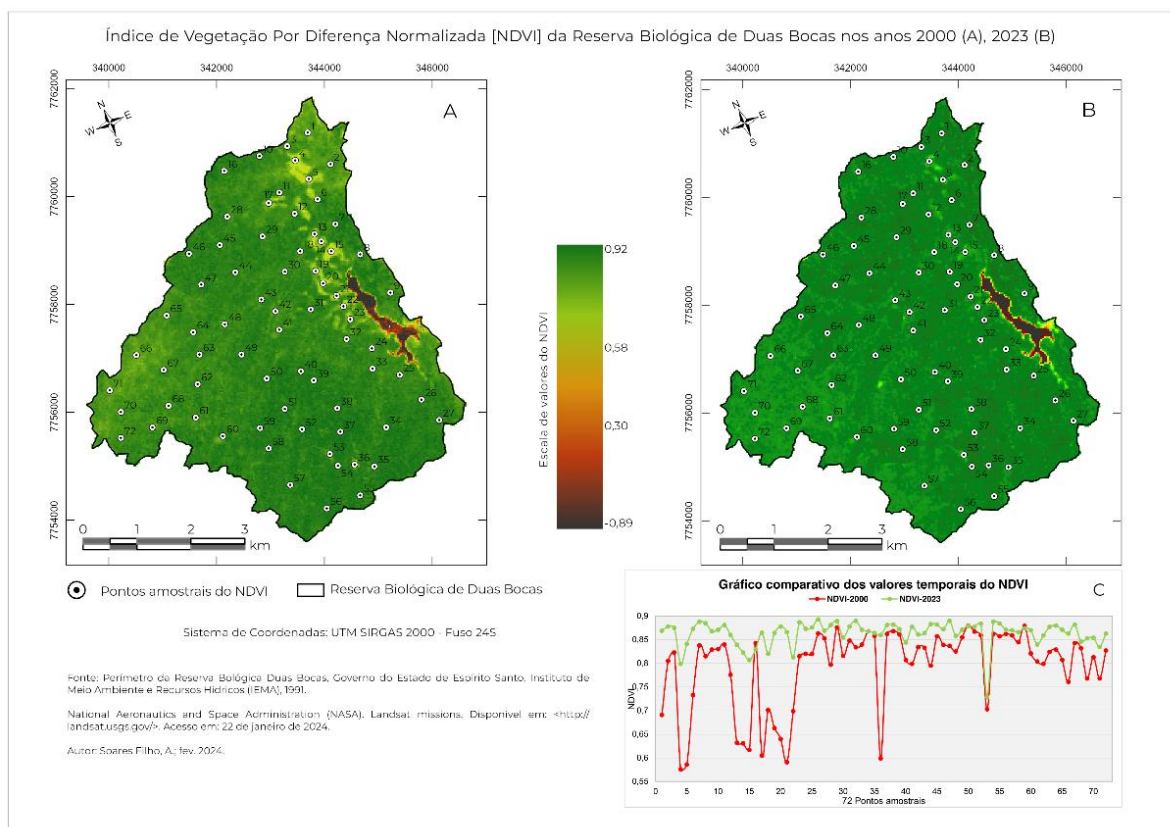
Os mapas da figura 5 apresentam a distribuição espacial do NDVI na ReBio de Duas Bocas para os anos de 2000 a 2023, demonstrando variações significativas na cobertura vegetal ao longo dos 23 anos analisados.

Na imagem de 2000 (Figura 5 - A), observam-se reduções nos valores de NDVI (0,40 e 0,55), representados pelas cores amarela e laranja, principalmente nas porções norte e leste da ReBio. Esses valores sugerem predomínio de vegetação arbustiva ou rala, pouca biomassa, solos expostos ou pastagens em diferentes estágios de desenvolvimento.

Tal padrão não se repete na imagem de 2023 (Figura 5 - B), em que há aumento geral nos valores de NDVI, refletindo provável regeneração natural, posterior à criação da ReBio.

A figura 5 - C sumariza essa tendência, de modo geral, todos os valores de NDVI obtidos em 2023 foram superiores aos de 2000, para os mesmos pixels. Indicativo de que houve aumento e significativa alteração na cobertura vegetal da área investigada.

No entanto, interpretações baseadas unicamente no NDVI podem sofrer influência de fatores como condições atmosféricas, geometria solar e características estruturais da vegetação. Dessa forma, análises complementares são recomendadas para reduzir essas incertezas.



**Figura 5:** Índice de Vegetação por Diferença Normalizada dos anos de 2000 e 2023.

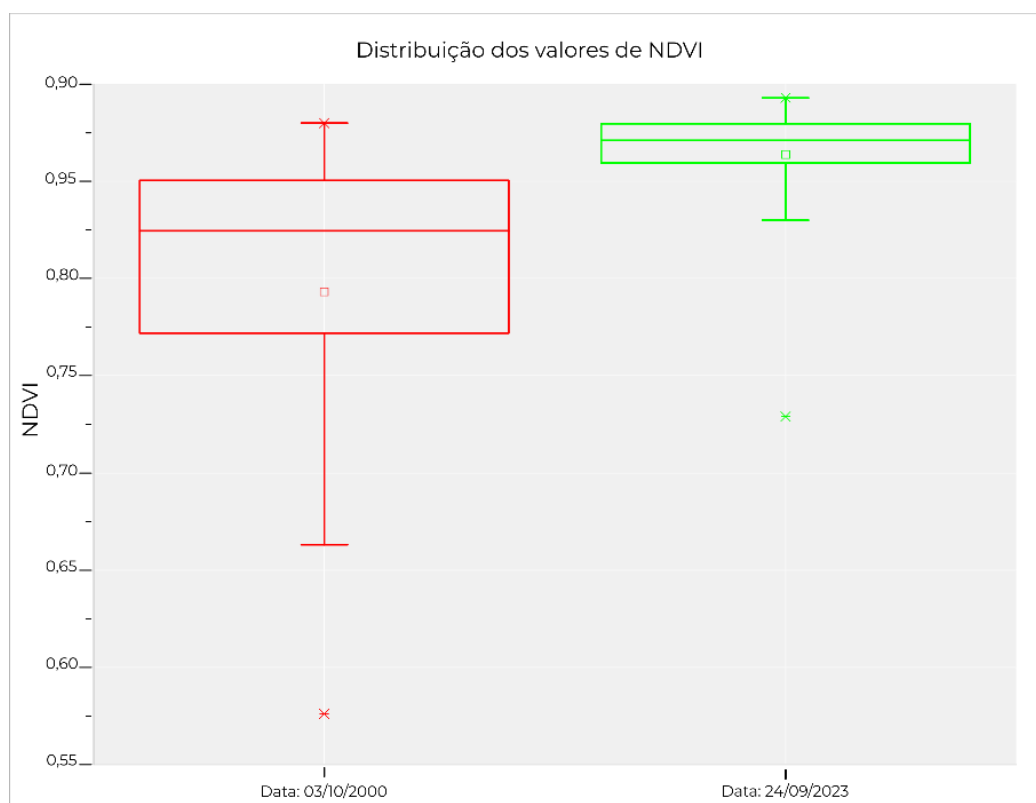
**Fonte:** Os autores (2024).

A figura 6 apresenta o *boxplot* com os 72 valores amostrais de NDVI, analisados nas duas imagens 2000 e 2023.

Para o ano de 2000, observa-se expressiva variação nos valores de NDVI, com predominância de dados distribuídos entre 0,76 e 0,85 demonstrando maior variabilidade espectral. O índice apresentou valor mínimo de 0,57, máximo de 0,87 e média de 0,79. Os 25% dos menores valores concentram-se entre 0,66 e 0,77 e os 25% dos maiores valores situaram-se no intervalo de 0,84 a 0,87.

Esse padrão sugere a presença de vegetação densa, compatível com o comportamento espectral previsto para um remanescente florestal em processo natural de regeneração ou sujeito a algum grau de alteração ambiental.

Em 2023, os dados apresentam maior homogeneidade, com distribuição mais concentrada entre 0,84 e 0,86, indicando menor variabilidade espectral. O NDVI apresentou valor mínimo de 0,72, máximo de 0,89 e média de 0,86. Reforçando o avanço do processo regenerativo da ReBio.



**Figura 6:** Boxplot dos pontos amostrais de NDVI da Reserva Biológica de Duas Bocas, entre 2000 e 2023.

**Fonte:** Os autores (2024).

Para ampliar a interpretação, os valores digitais do NDVI foram reclassificados e sistematizados em cinco classes, de acordo com a atividade vegetativa: sem vegetação, baixo, moderado, alto e muito alto que estão dispostas na tabela I.

**Tabela I:** Distribuição dos valores de área e percentual de atividade vegetativa em diferentes cenários na ReBio de Duas Bocas.

Classificação	NDVI-2000		NDVI-2023	
	Área em ha	Área em %	Área em ha	Área em %
Sem vegetação	37,44	1,24	37,89	1,26
Baixo	8,54	0,29	5,06	0,17
Moderado	101,71	3,37	9,25	0,30
Alto	922,94	30,62	203,13	6,74
Muito Alto	1.943,21	64,48	2.758,51	91,53
<b>Total</b>	<b>3.013,84</b>	<b>100</b>	<b>3.013,84</b>	<b>100</b>

**Fonte:** Os autores (2024).

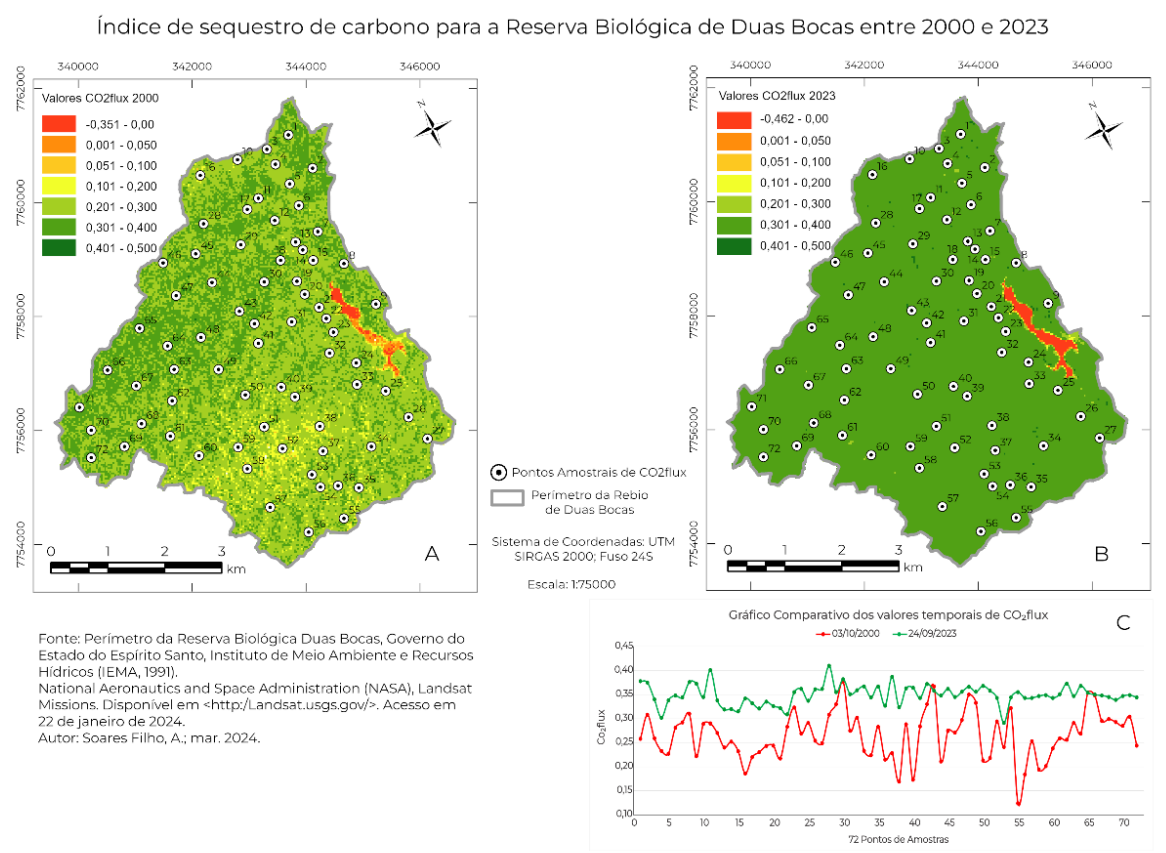
A classe sem vegetação corresponde aos menores valores de NDVI e está associada predominantemente às áreas com presença de corpos d'água. Quando comparados os dois períodos, observa-se um leve incremento na extensão dessas regiões em 2023.

As classes baixo, moderado e alto apresentaram os valores mais elevados de NDVI em 2000 e redução significativa desses valores em 2023, enquanto a classe muito alto aumentou de 64,48% para 91,53% da área de ReBio. Esse avanço é equivalente a mais de 815 ha, constituindo forte indicativo de mudanças relevantes ao longo do período, especialmente do aumento da densidade e do vigor vegetativo na Reserva em 2023.

### 3.3. Simulação do sequestro de carbono em séries temporais com $\text{CO}_2\text{flux}$

A aplicação do  $\text{CO}_2\text{flux}$  em áreas de conservação, como a ReBio de Duas Bocas, que abriga remanescentes de Mata Atlântica, reforça sua relevância para os serviços ecossistêmicos, especialmente na remoção de  $\text{CO}_2$  da atmosfera. Os resultados apresentados na figura 7 evidenciam o aumento significativo da eficiência fotossintética e do sequestro de carbono na ReBio ao longo do período pesquisado.

Em 2000 (Figura 7 - A), predominaram valores de  $\text{CO}_2\text{flux}$  entre 0,10 e 0,30 ( $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Em 2023 (Figura 7 - B), verificou-se a expansão de áreas com valores superiores aos citados, indicando maior capacidade de sequestro de carbono. Os 72 pontos amostrais, representados na figura 7 - C, confirmam essa tendência, com aumento consistente de  $\text{CO}_2\text{flux}$  em todos os locais avaliados, evidenciando as alterações ambientais ocorridas no período analisado.



**Figura 7:** Índice  $\text{CO}_2\text{flux}$  elaborado com base nos dados Landsat-5/8 entre 2000 e 2023.

**Fonte:** Os autores (2024).



A tabela II destaca os 13 pontos com maiores diferenças entre as datas. Todos os valores de CO<sub>2</sub>flux em 2023 excedem os valores máximos observados em 2000. Destaca-se o ponto 40, o que apresentou o maior incremento (de 0,173 para 0,364). Observa-se ainda que o maior valor encontrado em 2000 é inferior ao menor valor registrado em 2023, evidenciando um salto na eficiência de sequestro de carbono da ordem de grandeza de 0,165.

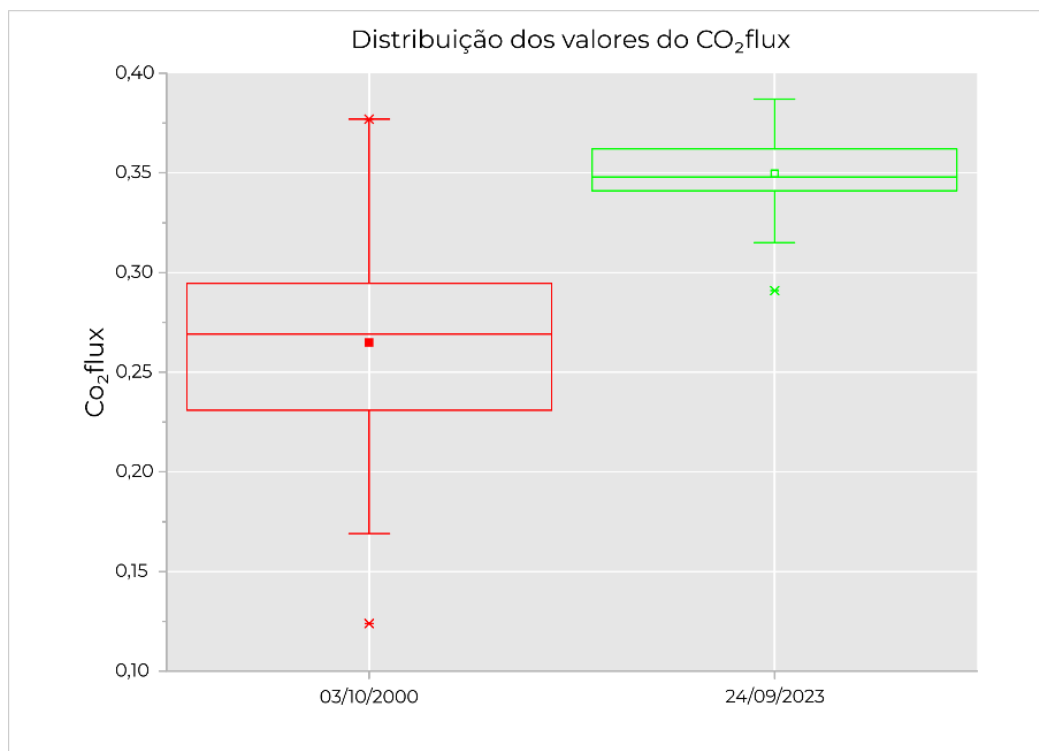
**Tabela II:** Apresentação de treze pontos que apresentam as maiores diferenças entre os valores de CO<sub>2</sub>flux de 2000 e 2023.

Ponto amostral	CO <sub>2</sub> flux-2000	CO <sub>2</sub> flux-2023
	Valor	Valor
9	0,222	0,373
16	0,186	0,342
33	0,233	0,367
37	0,228	0,387
38	0,169	0,324
40	0,173	0,364
44	0,211	0,348
50	0,213	0,368
51	0,218	0,358
55	0,124	0,355
56	0,184	0,343
58	0,194	0,347
59	0,201	0,349

**Fonte:** Os autores (2024).

O aumento detectado está associado à intensificação da atividade fotossintética no fragmento de Mata Atlântica da ReBio de Duas Bocas ao longo dos 23 anos. Conforme discutido por Baptista (2004), que relaciona maior absorção nas bandas do azul e vermelha à maior eficiência de sequestro de carbono.

O *boxplot* (Figura 8) evidencia forte discrepância entre os anos analisados. Em 2000, observa-se elevada dispersão e presença de valores extremos, com a maior parte dos dados concentrados entre os valores de 0,22 e 0,31 indicativo de heterogeneidade estrutural da vegetação.



**Figura 8:** *Boxplot* dos pontos amostrais de CO<sub>2</sub>flux na ReBio de Duas Bocas, de 2000 e 2023.

**Fonte:** Os autores (2024).

Em contraste, o *boxplot* de 2023 possui hastes pequenas, baixos valores extremos, mais homogêneos, com baixa variabilidade e média alinhada à mediana. Os dados de 2023 estão distribuídos entre os valores de 0,34 e 0,38, consideravelmente superiores aos valores de 2000, sugerindo maior continuidade da cobertura florestal.

A tabela III sintetiza as estatísticas descritivas.

**Tabela III:** Estatística básica do CO<sub>2</sub>flux para os anos de 2000 e 2023.

	CO <sub>2</sub> flux-2000	CO <sub>2</sub> flux-2023
	Valor	Valor
Mínimo	0,12	0,29
Máximo	0,38	0,41
Média	0,26	0,35
Mediana	0,27	0,35
Desvio Padrão	0,05	0,02
Coeficiente de variação	18,60	5,90

**Fonte:** Os autores (2024).

O CO<sub>2</sub>flux médio passou de 0,26% (cv = 18,60%) em 2000 para 0,35% (cv = 5,90%) em 2023. O que reflete um aumento de aproximadamente 32% na eficiência de

sequestro de carbono. Esses resultados reforçam o papel da regeneração florestal da ReBio na mitigação de emissões de CO<sub>2</sub>.

Por fim, os dados demonstram que a restauração da Mata Atlântica ocorrida a partir de sua transformação para a condição de Reserva Biológica contribuiu significativamente no incremento dos valores de CO<sub>2</sub>flux entre o interstício pesquisado.

#### **4. Considerações finais**

A utilização de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto e de índices espectrais como NDVI e CO<sub>2</sub>flux demonstrou-se eficiente para avaliar padrões ambientais em áreas de difícil acesso, reduzindo custos operacionais, ampliando a capacidade de monitoramento e potencializando análises ambientais para as condições encontradas na ReBio de Duas Bocas. Os resultados obtidos demonstram a evolução da cobertura vegetal e o incremento da eficiência do sequestro de carbono na ReBio de Duas Bocas.

O NDVI mostrou-se sensível à variação temporal da densidade foliar e da biomassa, enquanto o CO<sub>2</sub>flux permitiu identificar alterações relacionadas à capacidade de sequestro de carbono. A integração desses indicadores confirmou a regeneração natural da Mata Atlântica na ReBio de Duas Bocas.

Esses resultados reforçam a relevância ecológica da unidade de conservação para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos associados à cobertura vegetal, incluindo a remoção de CO<sub>2</sub> atmosférico, a melhoria das condições ambientais locais e das condições de vida da comunidade capixaba.

#### **Agradecimentos**

Agradeço ao programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) e ao Laboratório de Monitoramento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LAMOSA) pelo apoio logístico com os dados de campo. Esta pesquisa foi realizada sem ônus para a instituição receptora do pesquisador de pós-doutorado.

#### **Bibliografia**

- André, C. (2012). Abordagem historiográfica sobre a Reserva Biológica de Duas Bocas/Cariacica - ES (1912-1991). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, ES. Disponível em: [https://ape.es.gov.br/Media/ape/PDF/Disserta%C3%A7%C3%B5es%20e%20Teses/Hist%C3%B3ria-UFES/UFES\\_PPGHIS\\_CLAYTON\\_ANDR%C3%89.pdf](https://ape.es.gov.br/Media/ape/PDF/Disserta%C3%A7%C3%B5es%20e%20Teses/Hist%C3%B3ria-UFES/UFES_PPGHIS_CLAYTON_ANDR%C3%89.pdf)
- Baptista, G. M. de M. (2003). Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados Aviris e Hyperion. Anais Do XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. Belo Horizonte, Brasil. INPE, 1037–1044.
- Baptista, G. de M. de M. (2004). Mapeamento do sequestro de carbono e de domos urbanos de CO<sub>2</sub> em ambientes tropicais, por meio de sensoriamento remoto hiperespectral.

Geografia, 29(2), 189–202.

- Barros, P. P. da S., Rosalen, D. L., Filho, F. H. I., Martins, G. D., & Leo, N. D. (2021). Monitoramento Fitossanitário Utilizando Sensoriamento Remoto: Avanços e Desafios. *Revista Brasileira de Cartografia*, 73(2), 489–515. <https://doi.org/10.14393/revbrascartogr>
- Bernstein, L. S., Jin, X., Gregor, B., & Adler-Golden, S. M. (2012). Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades. *Optical Engineering*, 51(11), 111719. <https://doi.org/10.1117/1.oe.51.11.111719>
- Brandão, A. J., & Barreto, P. (2016). Emissões de GEE do setor mudança de uso da Terra (1990-2014). (p. 54). Belém; Imazon. Disponível em: <https://imazon.org.br/publicacoes/emissoes-de-gee-do-setor-de-mudanca-de-uso-da-terra-1990-2014/>
- Brazil, Ministry of the Environment. (2010). Office of the National Program for Biodiversity Conservation - DCBio. Fourth National Report to the Convention on Biological Diversity: Brazil. Brasília: Ministry of the Environment. 286 p.
- CPRM- Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (2012). Geologia e recursos minerais da folha Nova Venécia SE.24-Y-B-IV, estado do Espírito Santo, escala 1:100.000. Belo Horizonte. 289 p.
- Cunha, A. de M., Feitoza, H. N., Feitoza, L. R., Oliveira, F. S. de, Lani, J. L., Cardoso, J. K. F., & Trindade, F. S. (2016). Atualização da legenda do mapa de reconhecimento de solos do Espírito Santo e implementação de interface no Geobases para uso dos dados em SIG. *Geografares*, 2(22), 32–65. <https://doi.org/10.47456/geo.v2i22.30205>
- Espírito Santo, E. do. Lei nº 2095 de 12 de janeiro de 1965. Cria a Reserva Florestal de Duas Bocas no município de Cariacica. *Diário oficial do Estado do Espírito Santo* de 16/01/1965.
- Espírito Santo, E. do. Lei nº 4503 de 02 de janeiro de 1991. Transforma a Reserva Florestal de Duas Bocas em Reserva Biológica Estadual de Duas Bocas. *Diário oficial do Estado do Espírito Santo* de 03/01/1991.
- Espírito Santo., E. do. Lei nº 8488 de 19 de abril de 2007. Denomina Reserva Biológica Paulo Fraga Rodrigues a Reserva Biológica de Duas Bocas. *Diário oficial do Estado do Espírito Santo* de 20/04/2007.
- Folharini, S. O., & Oliveira, R. C. de. (2017). Cálculo do índice espectral CO<sub>2</sub>flux em área de Mata Atlântica e sua relação com processos gravitacionais no município de Cubatão. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Os Desafios Da Geografia Física Na Fronteira Do Conhecimento. Instituto de Geociências - Unicamp., 4642–4653.
- Frolking, S., Palace, M. W., Clark, D. B., Chambers, J. Q., Shugart, H. H. & Hurtt, G. C. (2009). Forest disturbance and recovery: A general review in the context of spaceborne remote sensing of impacts on aboveground biomass and canopy structure: Remote Sensing of Forest Disturbance. *Journal of Geophysical Research*, 114(G2). <https://doi.org/10.1029/2008jg000911>
- Gamon, J. A., Serrano, L., & Surfus, J. S. (1997). The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. *Oecologia*, 112(4), 492–501. <https://doi.org/10.1007/s004420050337>
- Hansen, A. J., Neilson, R. P., Dale, V. H., Flather, C. H., Iverson, L. R., Currie, D. J., Shafer,

- S., Cook, R. & Bartlein, P. J. (2001). Global change in forests: Responses of species, communities, and biomes. *Bioscience*, 51(9), 765. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0765:GCIFRO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0765:GCIFRO]2.0.CO;2)
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O. & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? *Trends in Ecology & Evolution*, 15(2), 56–61. [https://doi.org/10.1016/s0169-5347\(99\)01764-4](https://doi.org/10.1016/s0169-5347(99)01764-4)
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2012). Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico: inventário das formações florestais e campestres: técnicas e manejo de coleções botânicas: procedimentos para mapeamentos. IBGE. Rio de Janeiro, RJ: IBGE. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). Malha municipal digital e áreas territoriais, 2022: informações técnicas e legais para a utilização dos dados publicados. IBGE. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=downloads>
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2023). Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Risk Assessment Database v1.0, NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC), IPCC DDC. <https://doi.org/10.7927/pzv8-ta24>
- Kaufman, Y. J., Wald, A. E., Remer, L. A., Gao, B.-C., Li, R.-R., & Flynn, L. (1997). The MODIS 2.1-/spl mu/m channel-correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5), 1286-1298. <https://doi.org/10.1109/36.628795>
- Keskitalo, E. C. H., Westerhoff, L., & Juhola, S. (2012). Agenda-setting on the environment: the development of climate change adaptation as an issue in European states: Agenda-Setting on the Environment. *Environmental Policy and Governance*, 22(6), 381–394. <https://doi.org/10.1002/eet.1579>
- Kokaly, R. F., Clark, R. N., Swayze, G. A., Livo, K. E., Hoefen, T. M., Pearson, N. C., ... Klein, A. J. (2017). USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey Data Series 1035. USGS, 61 p. <https://doi.org/10.3133/ds1035>
- Lage, C. A., Ribeiro, J. P. F., & de Mello Baptista, G. M. (2015). Análise do Sequestro de Carbono com Dados Hiperespectrais Hyperion Reamostrados para WorldView 2. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. João Pessoa-PB, Brasil: INPE. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1244.pdf>
- López, J. F. B. (2016). Interceptação de águas pluviais em um fragmento de Mata Atlântica da Reserva Biológica de Duas Bocas, Cariacica (ES) Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo. Disponível em: <https://dspace4.ufes.br/items/31beb6b1-8ea9-404d-802d-714414fd6606/full>

- Martins, L. N., & Baptista, G. M. de M. (2013). Multitemporal analysis of forest carbon sink at carão settlement project, acre. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 6(6). <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20130045>
- Merçon, L., Pereira, O., & Thomaz, L. (2012). Últimos Refúgios: Reserva Biológica de Duas Bocas. Vitória - ES.: Associação Últimos Refúgios.
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Fonseca, G. A. da, & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- National Research Council. (2010). Adapting to the Impacts of Climate Change. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/12783>
- Ninan, K. N., & Inoue, M. (2013). Valuing forest ecosystem services: What we know and what we don't. *Ecological Economics: The Journal of the International Society for Ecological Economics*, 93, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.05.005>
- Oliveira, W.D. (2023). Classificação climática do Espírito Santo: da zona climática ao topoclima. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais. Disponível em: <https://geografia.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGG/detalhes-da-tese?id=20078>
- Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37–42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>
- Peres, C. A. (2005). Why we need megareserves in Amazonia. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, 19(3), 728–733. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00691.x>
- Polonio, V., Filgueiras, R., De Carvalho, T. M., Nicolete, D. A. P., Sartori, A. A. D. C., & Zimback, C. R. (2015). Avaliação temporal do sequestro de carbono por meio de imagens orbitais na região de Botucatu-SP. *Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, João Pessoa-PB, 4025–4032. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0797.pdf>
- Ponzoni, F., Shimabukuro, Y., & Kuplich, T. (2015). Sensoriamento remoto da vegetação. Oficina de Textos.
- Protected Planet. (2024). Home. Disponível em: <https://www.protectedplanet.net/en>
- Rahman, A. F., Gamon, J. A., Fuentes, D. A., Roberts, D. A., & Prentiss D. (2001). Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. *Journal of Geophysical Research*, 106(D24), 33.
- Ribeiro, R. C., Oliveira, F. G. de, & Anjos, C. S. (2019). Análise da resposta espectral da vegetação nativa do bioma cerrado nas diferentes estações do ano. *Anais Do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Inpe.br, 1(1), 2588–2591. Disponível em: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2019/10.04.18.21/doc/thisInformationItemHomePage.html>
- Rouse W., Haas Jr., R. H., Well J. A., & Deering D. W. (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with Ert. NASA. Goddard Space Flight Center 3d ERTS-1 Symp., Vol. 1, Sect. A.
- Santos, C. V. B. dos, Mello Baptista, G. M. de, Moura, M. S. B. de, Barros Silva, A. de, Franca-



- Rocha, W. de J. S. da, Sousa Carvalho, H. F. de, & Galvêncio, J. D. (2023). Validação de um modelo espectral para determinação de fluxos de CO<sub>2</sub> em áreas do Bioma Caatinga. <https://doi.org/10.24221/jeap.8.3.2023.4724.226-239>
- Silva, S. C. P. D. A., & Baptista, G. M. D. E. M. (2015). Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de CO<sub>2</sub> em diferentes ambientes na Amazônia brasileira. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 21(2), 354–370. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702015000200020>
- Silva, M. A., & dos Anjos, C. S. (2021, setembro). Análise do sequestro de carbono na região do Parque Nacional da Chapada dos Veadeiros utilizando técnicas de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geomática*, 9(3), 251–270. <https://doi.org/10.3895/rbgeo.v9n3.13542>
- Silva, M. A. S. da, & Faria, A. L. L. de (2023). Índice CO<sub>2</sub>flux para avaliar perdas de serviços ecossistêmicos em mangues impactados por tempestade de granizo no Sudeste do Brasil. *Geosp*, 27(3.e-200530), 1-19. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2023.200530.pt>
- Soares Filho, A., Farinha, M. J. U. S., Bernardo, L. V. M., & Ruviaro, C. F. (2019). Estimativa da eficiência do sequestro de carbono em vegetação natural de uma unidade de conservação, usando dados de imagens CBERS-4 em Jardim–MS. *Anais 7 Simpósio de Geotecnologias No Pantanal. Jardim, MS. Embrapa Informática/INPE*, 1, 210–219.
- Travis, J. M. J. (2003). Climate change and habitat destruction: a deadly anthropogenic cocktail. *Proceedings. Biological Sciences*, 270(1514), 467–473. <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2246>
- Trentin, C. B. (2011). Análise da resposta espectral da vegetação da Área de proteção Ambiental (APA) do Ibirapuitã em imagens do sensor EOS/MODIS associadas ao solo e aos elementos do clima. *Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre, BR-RS*.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (2022). Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. Online. Disponível em 15 de outubro de 2022 em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>
- Wang, J., Li, L., Lam, S. K., Zhang, X., Liu, X., & Pan, G. (2018). Changes in nutrient uptake and utilization by rice under simulated climate change conditions: A 2-year experiment in a paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 202–208. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.12.254>

---

*Artigo recebido em / Received on: 12/08/2024*

*Artigo aceite para publicação em / Accepted for publication on: 30/12/2025*

*Página intencionalmente deixada em branco*