

Roteiro Metodológico – Atividade Avaliativa

Resiliência ecológica de áreas de cacau sombreado no município de Ilhéus (BA) a partir da estabilidade interanual do NDVI (2019–2023)

Introdução

A resiliência de um sistema ecológico refere-se à sua capacidade de absorver perturbações e ainda persistir, ou seja, manter suas funções e estruturas essenciais, mesmo diante de instabilidades e flutuações significativas nas populações (Holling, 1973). Ao contrário da estabilidade, que foca apenas na resistência a pequenas variações próximas ao equilíbrio, a resiliência enfatiza a persistência e a probabilidade de sobrevivência do sistema a longo prazo. Como demonstrado por Tucker e colaboradores (1976, 1977), índices espectrais baseados em combinações do infravermelho próximo e do vermelho, como o NDVI, apresentam forte correlação com a biomassa verde e são sensíveis às mudanças fenológicas e composição do dossel. Esses índices permitem monitorar a estabilidade da cobertura vegetal ao longo do tempo, aspecto essencial para avaliar a resiliência ecológica em sistemas agroflorestais como o cacau sombreado. Além disso, o uso do NDVI possibilita minimizar interferências do solo e variações angulares, assegurando maior confiabilidade nas análises regionais baseadas em séries temporais de imagens Sentinel-2, conforme adotado neste estudo.

Como destacado por Pettorelli et al. (2006), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) derivado de dados de satélite constitui uma ferramenta crucial para avaliar a dinâmica da vegetação e as respostas ecológicas às mudanças ambientais em larga escala temporal e espacial. O NDVI permite extrair informações sobre a biomassa e a fenologia da vegetação, o que é fundamental para entender a resiliência ecológica em ecossistemas sujeitos a perturbações climáticas e antrópicas. Portanto, sua aplicação em estudos locais, como a análise da resiliência ecológica em Ilhéus, contribui para o monitoramento integrado da degradação e recuperação ambiental, apoiando estratégias de conservação e manejo.

O sul da Bahia, incluindo o município de Ilhéus, destaca-se pela produção significativa de cacau sombreado, que além do valor econômico contribui para a conservação da biodiversidade local por meio dos sistemas agroflorestais (SAFs). Em 2018, aproximadamente 37% da área do G6, região que inclui Ilhéus, era coberta por cultivo de cacau sombreado, enquanto áreas de pasto degradadas apresentam potencial para recuperação via SAFs (MapBiomass Cacau, 2020, p. 12; p. 15). O mapeamento dessas áreas considera variáveis legais, agronômicas e econômicas, como relevo, solo, hidrografia, áreas de preservação permanente, unidades de conservação e terras indígenas, evidenciando sua importância para a conectividade ecológica e preservação ambiental regional (MapBiomass Cacau, 2020, p. 32; p. 12). Os dados do MapBiomass Cacau fornecem subsídios para o planejamento territorial sustentável, políticas públicas e manejo que favorecem a resiliência e sustentabilidade da cacauicultura na região (MapBiomass Cacau, 2020, p. 43).

Para a realização da análise de resiliência ecológica nas áreas de cultivo sombreado de cacau no município de Ilhéus, utilizamos os dados de mapeamento de cacau sombreado produzidos pela iniciativa MapBiomass Cacau, conforme apresentado no relatório realizado para 83 municípios do sul da Bahia. Esse mapeamento, baseado em técnicas avançadas de sensoriamento remoto e classificação Random Forest aplicados a imagens Sentinel-2, Planet e modelos digitais de terreno (SRTM), forneceu uma delimitação espacial precisa das áreas ocupadas pelo cacau sombreado, com acurácia próxima de 80% para essa classe. A base de dados permitiu identificar a distribuição dessas áreas principalmente em terrenos com baixa declividade e proximidade a rios, facilitando a análise da dinâmica ecológica por meio do NDVI. Assim, os dados derivados desse estudo fornecem a base

espacial essencial para avaliar a resiliência e o estado de conservação das áreas de cultivo sombreado no contexto agroecológico de Ilhéus.

1. Objetivo

Analisar a estabilidade interanual do NDVI (2019–2023) em áreas classificadas como cacau sombreado no município de Ilhéus (BA), visando compreender sua resiliência ecológica frente às variações climáticas e ambientais.

2. Justificativa

A resiliência ecológica refere-se à capacidade de um ecossistema de absorver distúrbios e manter suas funções essenciais (Holling, 1973). Segundo o autor, “a resiliência enfatiza a persistência e a probabilidade de sobrevivência do sistema a longo prazo, mesmo diante de instabilidades”.

Em sistemas agroflorestais como o cacau sombreado, essa resiliência está ligada à manutenção da cobertura vegetal e à capacidade de resistência e recuperação frente a perturbações climáticas. A aplicação de índices espectrais como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) permite monitorar essa estabilidade, correlacionando diretamente com a biomassa verde e a dinâmica fenológica da vegetação (Tucker, 1979; Pettorelli et al., 2005).

Segundo Ma et al. (2023), a análise de séries temporais do NDVI permite avaliar a resistência (redução de produtividade frente a um distúrbio) e a resiliência (recuperação subsequente). Smith e Boers (2023) identificam que a resiliência é maior em regiões com maior disponibilidade hídrica e menor variabilidade interanual da precipitação, o que torna relevante seu monitoramento na região cacaueira de Ilhéus.

A região sul da Bahia, incluindo Ilhéus, concentra mais de 37% das áreas de cultivo sombreado de cacau (MapBiomias Cacau, 2020, 2023), que desempenham função ecológica fundamental ao combinar valor econômico e conservação ambiental. O mapeamento destas áreas com base em imagens Sentinel-2, Planet e modelos digitais de terreno fornece uma base espacial robusta para avaliação da dinâmica ecológica por NDVI.

3. Metodologia

3.1. Delimitação da Área de Estudo

Município de Ilhéus, Bahia – selecionado por sua relevância na produção de cacau sombreado e pela disponibilidade de dados geoespaciais.

3.2. Dados Utilizados

- **MapBiomias Cacau (2019):** Mapeamento das áreas de cacau sombreado com base em classificação Random Forest.
- **MapBiomias Cacau – Fase 2 (2020):** Estimativa de áreas potenciais para SAFs com cacau e características ambientais associadas.
- **Imagens Sentinel-2 SR:** Para cálculo do NDVI, com resolução de 10 m, adequadas ao monitoramento da vegetação.
- **Shapefile de Ilhéus (IBGE):** Delimitação oficial do município para recorte espacial.

3.3. Processamento e Análise

1. Extração das áreas de cacau sombreado via asset do MapBiomas Cacau no Google Earth Engine (GEE).
2. Cálculo do NDVI nas imagens Sentinel-2 para o período seco (julho a outubro), minimizando interferência de nuvens.
3. Aplicação de métricas estatísticas: NDVI médio, desvio padrão e coeficiente de variação (CV), conforme Yengoh et al. (2015).
4. Visualização em mapas temáticos e gráficos temporais.

4. Resultados Esperados

- Tabela com valores anuais de NDVI médio, desvio padrão e CV.
- Gráfico de linha mostrando estabilidade anual da vegetação.
- Mapas temáticos do uso do solo (MapBiomas Cacau) e NDVI interanual.
- Integração entre análise espectral e distribuição espacial dos SAFs.

5. Resultados e Interpretação

O mapeamento do uso do solo no município de Ilhéus, com base nos dados da Fase 1 do MapBiomas Cacau (2021), revelou a expressiva presença de áreas classificadas como **cacau sombreado** (código 2), as quais ocupam aproximadamente 52.029 hectares do território municipal. Essas áreas estão distribuídas principalmente em regiões de relevo suave e próximas a cursos d'água, destacando a preferência histórica e agrônômica por ambientes com condições favoráveis ao desenvolvimento do sistema agroflorestal cacaueiro.

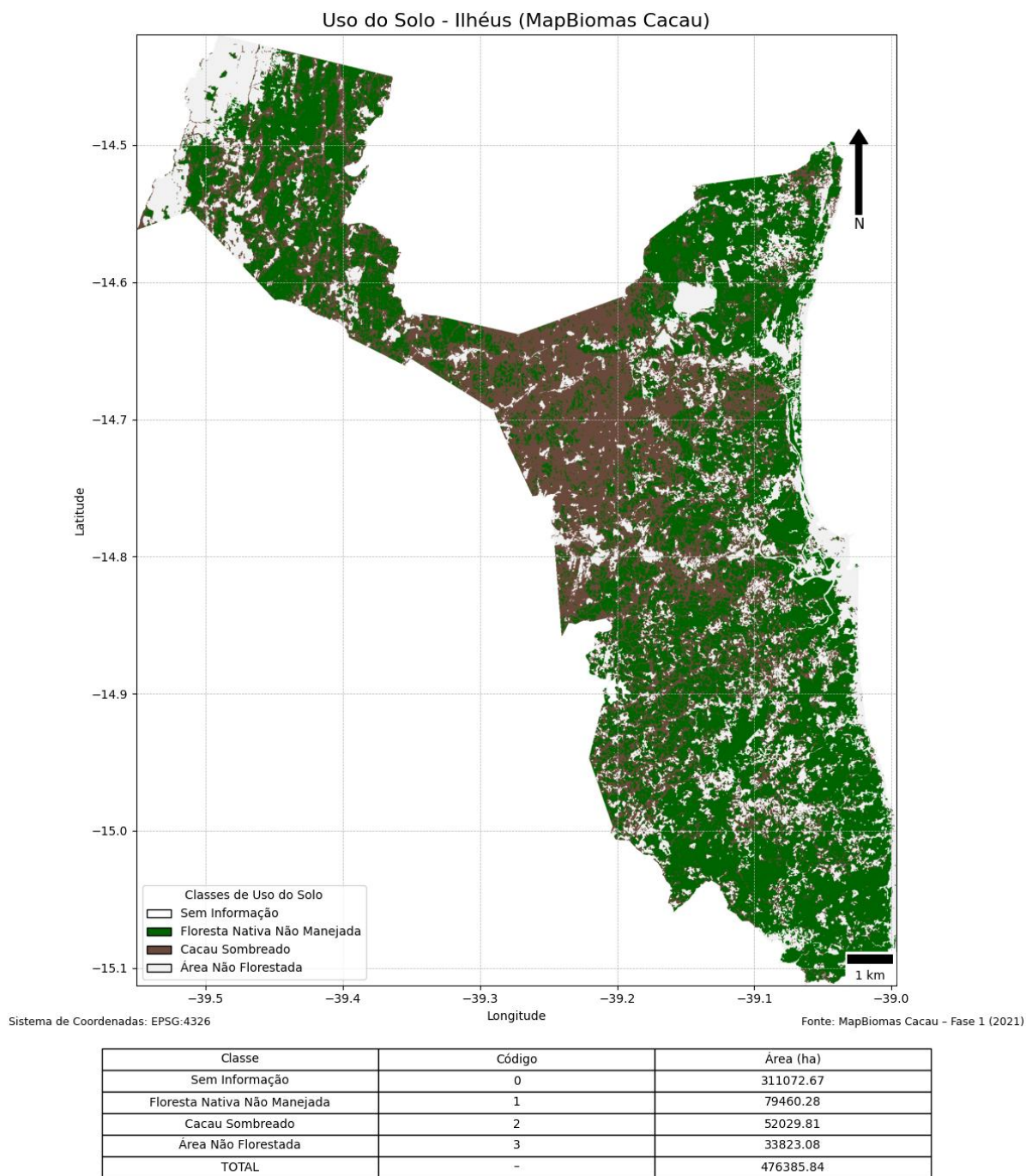


Figura 1. Mapa de uso do solo no município de Ilhéus (BA), com destaque para as classes de floresta nativa, cacau sombreado e áreas não florestadas. Fonte: MapBiomias Cacau – Fase 1 (2021).

Esses dados fornecem uma base essencial para o monitoramento da cobertura vegetal e para análises mais aprofundadas sobre a estabilidade ecológica das áreas produtivas. A partir dessa base espacial, foram delimitadas as áreas de interesse para o cálculo do NDVI e avaliação da resiliência da cobertura vegetal entre os anos de 2019 e 2023.

Além do cacau sombreado, observam-se expressivas porções de *floresta nativa não manejada* (código 1), que somam cerca de 79.460 hectares, reforçando a coexistência entre sistemas

produtivos agroflorestais e fragmentos de vegetação nativa. Áreas classificadas como *não florestadas* (código 3) ocupam cerca de 33.823 hectares e podem representar espaços com potencial para restauração ecológica e expansão sustentável da cacauicultura.

O mapa a seguir integra essa distribuição espacial das classes de uso do solo no município:

A análise interanual do NDVI médio em áreas de cacau sombreado no município de Ilhéus, entre 2019 e 2023, revelou uma tendência geral de declínio na vitalidade da vegetação (Tabela 1).

Tabela 1. Estatísticas descritivas do NDVI médio anual nas áreas de cacau sombreado (2019–2023), Ilhéus (BA).

Ano	NDVI Médio	Desvio Padrão	CV (%)
2019	0,67	0,15	22,42
2020	0,59	0,17	28,15
2021	0,69	0,14	19,95
2023	0,45	0,10	22,34

A Tabela 1 apresenta os valores de NDVI médio, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV%) para as áreas de cacau sombreado, no município de Ilhéus (BA), entre os anos de 2019 e 2023. Os dados foram obtidos a partir de imagens do Sentinel-2 (nível 2A), considerando a média dos pixels na estação seca (julho a outubro), com filtro de nuvem < 20%, e aplicando uma máscara espacial com base na classe 2 (Cacau sombreado) do MapBiomias Cacau.

O gráfico de linha (Figura 1) mostra que o valor médio do NDVI, que em 2019 era superior a 0,66, reduziu-se continuamente até atingir cerca de 0,45 em 2023. Esta variação representa uma queda de aproximadamente 32%, indicando possível redução da densidade foliar, vigor da vegetação ou aumento de distúrbios ambientais e produtivos ao longo do tempo.

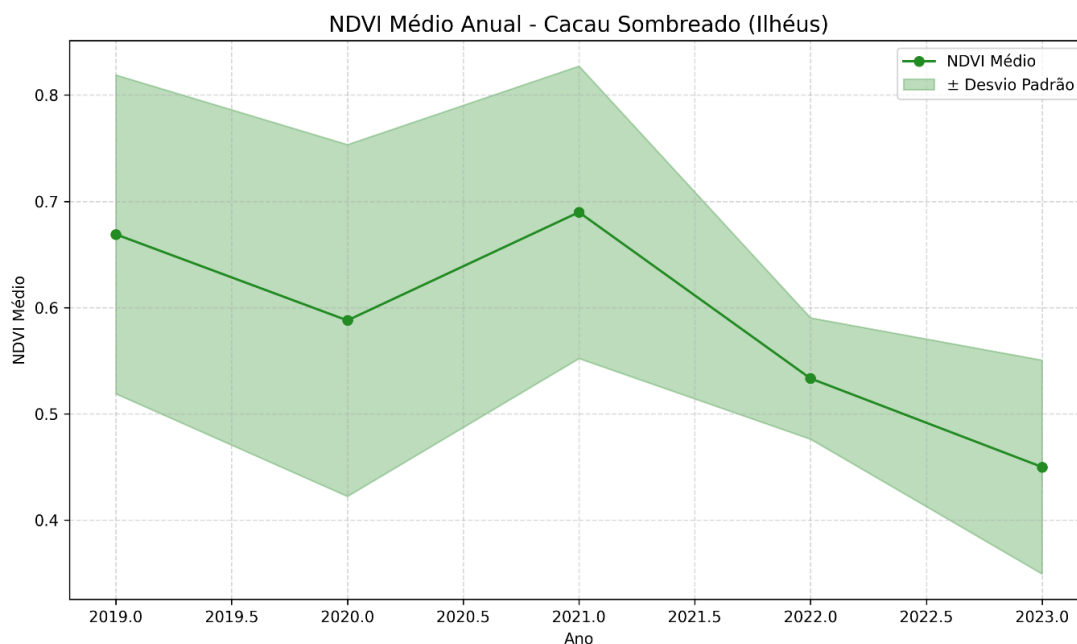


Figura 1: NDVI médio anual e desvio padrão em áreas de cacau sombreado no município de Ilhéus (2019–2023).

A faixa de desvio padrão (representada pela área sombreada no gráfico) mostra que a variabilidade do NDVI também aumentou nos anos mais recentes, sugerindo menor estabilidade interanual e maior heterogeneidade das condições de vegetação nas áreas analisadas. Esse padrão pode estar relacionado a estresses hídricos mais frequentes, mudanças no manejo agrícola ou processos de degradação localizada.

Nos mapas temáticos por ano (Figura 2), observa-se uma transição gradativa da vegetação de tons mais verdes ($\text{NDVI} > 0.6$) para tons amarelados e alaranjados (NDVI entre 0.3 e 0.5). Em 2019 e 2021, as áreas de cacau sombreado mantinham níveis elevados de NDVI em grandes porções do território, especialmente na região central e noroeste de Ilhéus. Já em 2022 e, sobretudo, em 2023, essas áreas apresentam sinais visíveis de perda de biomassa verde, com a emergência de manchas mais secas, provavelmente associadas a degradação ou impacto climático.

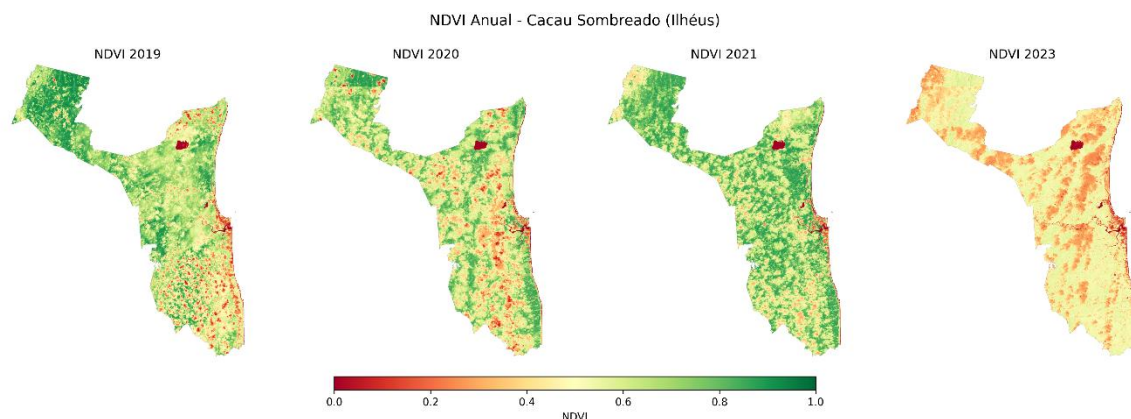


Figura 2: Mapas anuais do NDVI (período seco) no município de Ilhéus (2019–2023).

Essa tendência observada nos mapas e no gráfico quantitativo reforça a hipótese de que a resiliência ecológica das áreas de cacau sombreado pode estar sendo comprometida, sobretudo nos anos mais recentes. Essa condição sugere a necessidade de medidas de manejo adaptativo, monitoramento contínuo e integração com políticas públicas de conservação e restauração.

6. Referências

- Holling, C. S. (1973). *Resilience and stability of ecological systems*. Annual Review of Ecology and Systematics, 4(1), 1-23.
- Ma, Y. et al. (2023). *Changes in Vegetation Resistance and Resilience under Different Drought Disturbances Based on NDVI and SPEI*. Remote Sensing, 15(13), 3280.
- MapBiomias Cacau. (2023). *Mapeamento do cultivo sombreado de cacau no sul da Bahia*. <https://brasil.mapbiomas.org/mapbiomas-cacau/>
- MapBiomias Cacau. (2020). *Mapeamento de áreas potenciais para sistemas agroflorestais com cacau no Sul da Bahia – Fase 2*. <https://worldcocoafoundation.org/storage/files/mapbiomas-cacau-fase-2.pdf>
- Pettorelli, N. et al. (2005). *Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change*. Trends in Ecology & Evolution, 20(9), 503–510.
- Smith, T., & Boers, N. (2023). *Global vegetation resilience linked to water availability and variability*. Nature Communications, 14, 498.
- Tucker, C. J. (1979). *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation*. Remote Sensing of Environment, 8(2), 127–150.
- Yengoh, G. T. et al. (2015). *The use of the NDVI to assess land degradation*. STAP Technical Report. <https://www.thegef.org/sites/default/files/publications/stap-sdg-land-degradation.pdf>