

Article

Desenvolvimento de uma Metodologia para Detecção de Mudanças na Cobertura Vegetal com NDVI no Google Earth Engine: um Estudo de Caso em Maricá, RJ

Diego Ramos Inácio¹, Douglas Vieira Barboza², Dácio de Castro Vivas Neto³, Sávio Freire Bruno⁴

¹ Mestre em Engenharia de Biosistemas. Docente da Graduação de Engenharia de Software da Universidade de Vassouras. ORCID: 0000-0003-2002-2154. E-mail: diego.inacio@univassouras.edu.br

² Doutor em Sistemas de Gestão Sustentáveis. Universidade Iguazu e Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro. ORCID: 0000-0002-2653-8541. E-mail: douglas.barboza@campus1.unig.br

³ Doutor em Engenharia Civil. Universidade Federal Fluminense. ORCID: 0009-0006-6787-9533. E-mail: daciovivas@id.uff.br

⁴ Doutor em Medicina Veterinária. Docente no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Biosistemas na Universidade Federal Fluminense. 12 ORCID: 0000-0002-7267-9310. E-mail: saviobruno@id.uff.br

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo analisar as mudanças na cobertura vegetal no município de Maricá (RJ) que ocorreram entre 1984 - 2024, em oito intervalos quinquenais, utilizando imagens Landsat 5, 8 e 9, processadas no Google Earth Engine. As etapas de vetorização, cruzamento espacial e análise temporal foram conduzidas em ambiente Python local, com suporte das bibliotecas geopandas, pandas e matplotlib. Aplicou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para detectar alterações significativas na vegetação entre diferentes períodos, com limiares ajustados para refletir melhor a realidade local. A metodologia envolveu a compilação de dados espaciais, mascaramento de nuvens e corpos d'água, cálculo do NDVI e classificação das imagens em perda ($\Delta\text{NDVI} \leq -0,07$) ou ganho ($\Delta\text{NDVI} \geq 0,25$) no GEE; posteriormente, a vetorização dos resultados e a análise das diferenças temporais por bairro foram realizadas em ambiente Python local. Os dados apontaram forte expansão urbana entre 1989 e 1993, com perdas significativas de vegetação em bairros como Silvado, Espraiado e Lagarto, enquanto áreas como Ponta Negra e Cajueiros apresentaram ganhos nos últimos períodos avaliados. A análise revelou ainda bairros resilientes e dinâmicas distintas de perda e ganho de vegetação ao longo dos anos. Esses resultados foram discutidos em diálogo com o Plano Diretor de Maricá e a Lei nº 2.272/2008, que trata do uso e ocupação do solo, evidenciando a importância de integrar o monitoramento geoespacial às políticas públicas e ao planejamento urbano sustentável.

Palavras-chave: Mata Atlântica; sensoriamento remoto; monitoramento ambiental; Maricá; expansão urbana.

ABSTRACT

This study aims to analyze vegetation cover changes in the municipality of Maricá (RJ) that have occurred between 1984 and 2024, organized into eight five-year intervals, using Landsat imagery from Landsat 5, 8, and 9 satellites, processed in Google Earth Engine (GEE). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was applied to detect significant changes in vegetation across different periods, with thresholds adjusted to better reflect local conditions (loss: $\Delta\text{NDVI} \leq -0.07$; gain: $\Delta\text{NDVI} \geq 0.25$). Image classification was performed in GEE, while subsequent steps — including vectorization, spatial intersection with neighborhood boundaries, and temporal difference analysis — were conducted in a local Python environment using the geopandas, pandas, and matplotlib libraries. The data indicated a strong urban expansion between 1989 and 1993, with significant vegetation loss in neighborhoods such as Silvado, Espraiado, and Lagarto, while areas like Ponta Negra and Cajueiros showed gains in the most



Submissão: 01/08/2025



Aceite: 05/05/2026



Publicação: 18/06/2026



recent periods evaluated. The analysis also revealed resilient neighborhoods and distinct dynamics of vegetation loss and gain over the years. These results were discussed in connection with Maricá's Master Plan and Law No. 2.272/2008, which addresses land use and occupation, highlighting the importance of integrating geospatial monitoring into public policies and sustainable urban planning.

Keywords: Atlantic Forest; remote sensing; environmental monitoring; Maricá; urban expansion.

Introdução

A detecção de mudanças é uma técnica essencial em estudos ambientais, urbanísticos e de monitoramento de recursos naturais. No município de Maricá (RJ), observou-se um crescimento populacional de aproximadamente 130% entre 1991 e 2022 — passando de cerca de 60 mil para mais de 138 mil habitantes (IBGE 2023) — acompanhado por uma intensa pressão sobre ecossistemas sensíveis como restingas, encostas e manguezais. A expansão urbana avança sobre esses ecossistemas frágeis, tornando urgente o monitoramento das alterações na cobertura vegetal, uma vez que técnicas de sensoriamento remoto, como a aplicação do NDVI, são fundamentais para identificar padrões de degradação e regeneração da vegetação em áreas sujeitas à intensa pressão antrópica. Esse cenário evidencia a importância de ferramentas capazes de monitorar continuamente as alterações na cobertura vegetal e no uso do solo.

A dinâmica da paisagem e as transformações no uso e cobertura da terra são processos complexos que refletem a interação entre fatores naturais e antrópicos. Compreender essas mudanças é essencial para a gestão sustentável dos recursos naturais, o planejamento territorial e a conservação dos ecossistemas (Turner & Meyer 1994). Nesse contexto, a detecção de mudanças surge como uma ferramenta fundamental, permitindo monitorar e analisar alterações na paisagem ao longo do tempo. Uma das técnicas mais utilizadas para essa finalidade é o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), que possibilita avaliar a saúde da vegetação e a cobertura vegetal de forma eficiente e precisa (Rouse et al. 1974).

A programação desempenha um papel fundamental na análise de grandes volumes de dados geoespaciais. Python, em particular, emergiu como uma das linguagens mais populares para ciência de dados e análise ambiental devido à sua simplicidade, vasta biblioteca de ferramentas e suporte ativo da comunidade (Virtanen et al. 2020). Bibliotecas como NumPy, Pandas, Matplotlib e Geopandas facilitam o processamento, a visualização e a análise de dados geoespaciais, enquanto frameworks como Rasterio e GDAL ampliam suas capacidades para trabalhar com imagens de satélite (Rasterio Developers 2020).

O Google Earth Engine (GEE) é uma plataforma de computação em nuvem que oferece acesso a um vasto catálogo de imagens de satélite e ferramentas para análise geoespacial. Ele permite o processamento de grandes volumes de dados em tempo real, eliminando a necessidade de download e armazenamento local (Gorelick et al. 2017). O GEE é amplamente utilizado em estudos de detecção de mudanças devido à sua capacidade de processar séries temporais de imagens de satélite, como as do Landsat, Sentinel e MODIS (Tamiminia et al. 2020). Sua integração com Python, por meio da API Earth Engine, permite a criação de fluxos de trabalho personalizados e a aplicação de técnicas avançadas de análise geoespacial, como o cálculo de índices de vegetação, incluindo o NDVI (Gorelick et al. 2017).

Inácio et al. (2025) destacam a necessidade de ampliar a aplicação prática de metodologias baseadas no NDVI e na plataforma Google Earth Engine (GEE) em contextos tropicais e subtropicais, destacando também a carência de investigações voltadas a recortes geográficos subexplorados na América Latina. Nesse cenário, o desenvolvimento de uma metodologia robusta para a detecção e classificação de mudanças na cobertura vegetal ao longo do tempo, como a proposta neste estudo, representa um avanço significativo na superação dessas lacunas. Vale destacar que, embora Maricá esteja inserida em contexto tropical, a presença de diferentes fitofisionomias da Mata Atlântica — como restinga, manguezal e floresta ombrófila — impõe desafios



específicos na definição de limiares do NDVI, uma vez que cada uma dessas formações apresenta respostas espectrais distintas, dificultando a adoção de um valor único e universal, aspecto também ressaltado por Inácio et al. (2025) ao apontarem a necessidade de metodologias adaptadas a contextos tropicais e subtropicais.

A literatura evidencia a consolidação do NDVI como indicador eficaz na análise da vegetação, sobretudo quando integrado a plataformas de processamento em nuvem como o GEE, que, aliado à linguagem Python, ainda que o GEE seja nativo na linguagem JavaScript, viabiliza a automação de processos analíticos e o manuseio eficiente de grandes volumes de dados multitemporais (Nursaputra et al. 2021). A adoção dessa abordagem permite o monitoramento de alterações na vegetação em diferentes escalas espaciais e temporais, com resolução condicionada às características do sensor utilizado, utilizando tecnologias acessíveis e replicáveis, com forte potencial para subsidiar políticas públicas e ações de conservação ambiental em regiões vulneráveis. Assim, este estudo não apenas responde a diretrizes atuais da literatura, como também contribui para o aprimoramento de metodologias voltadas à compreensão das dinâmicas vegetacionais em ecossistemas sensíveis da Mata Atlântica — como restingas, manguezais e florestas ombrófilas — em acelerado processo de transformação.

Diante da necessidade de monitoramento contínuo das transformações ambientais em Maricá (RJ), município inserido no domínio da Mata Atlântica e sujeito a intensa pressão urbana decorrente do crescimento populacional de aproximadamente 130% entre 1991 e 2022 (IBGE 2023), este trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma metodologia sistemática para identificar e classificar áreas afetadas por mudanças na cobertura vegetal considerando o período de 1984 a 2024. A abordagem proposta fundamenta-se na aplicação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) a partir de imagens da série Landsat, processadas na plataforma Google Earth Engine (GEE) — cuja linguagem nativa é o JavaScript — com automação dos fluxos de trabalho realizada por meio da API Earth Engine em Python. A pesquisa contempla as etapas de seleção e filtragem das imagens disponíveis no catálogo do GEE, análise de dados multitemporais e aplicação de algoritmos para o cálculo do índice e a detecção das alterações. Ao delimitar padrões espaciais e temporais de mudança em uma região geográfica específica, a metodologia visa fornecer subsídios robustos para a avaliação de tendências e impactos ambientais. Além de priorizar a reprodutibilidade e a escalabilidade da abordagem, busca-se garantir sua aplicabilidade na identificação de padrões de degradação e regeneração da vegetação, com ênfase em áreas protegidas e zonas sujeitas à expansão urbana. A utilização de dados multitemporais possibilita uma análise mais sensível das dinâmicas de cobertura vegetal, especialmente em paisagens heterogêneas, destacando a importância de abordagens que reconheçam a complexidade dos sistemas ecológicos.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

O município de Maricá (Figura 1), situado na Região Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro, tem passado por um intenso processo de urbanização nas últimas décadas, impulsionado pela proximidade com a capital, investimentos em infraestrutura e a valorização do mercado imobiliário. O asfaltamento da Rodovia Amaral Peixoto (RJ-106), em 1952, deu início à ocupação de áreas litorâneas e lagunares, com a abertura de mais de 2.400 hectares em loteamentos. A duplicação da rodovia ampliou esse processo, estimulando a fixação de moradores sazonais e permanentes (Maricá 2022).

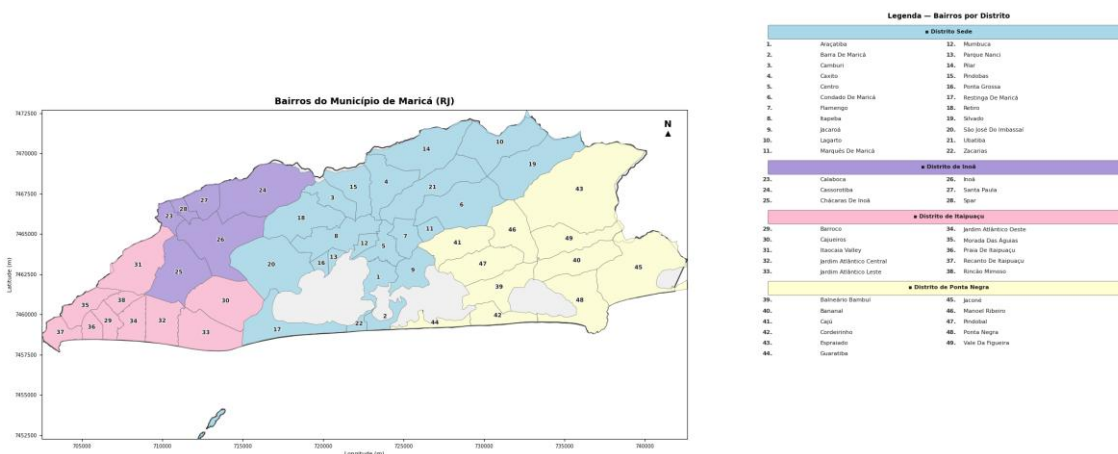


Figura 1 Mapa de localização dos bairros do Município de Maricá - RJ. Fonte: Produzidas pelos autores.

A valorização fundiária tem se intensificado com a chegada de grandes empreendimentos. Um laudo de 2023 avaliou um imóvel em Ponta Grossa em R\$ 682.000,00, com valor unitário superior a R\$ 2.300 por metro quadrado (Dexter Engenharia 2023). Além disso, a Prefeitura tem enfrentado o crescimento de obras e vendas irregulares, adotando medidas de fiscalização para coibir a ocupação desordenada (Maricá 2022).

Fatores regionais também influenciam a dinâmica territorial. A construção do COMPERJ, em Itaboraí, elevou os níveis de especulação na região (Silva 2009). O projeto MARAEY, empreendimento turístico-imobiliário de grande porte previsto para ser instalado em uma Área de Proteção Ambiental (APA), suscitam preocupações sobre a degradação ambiental e a desterritorialização da comunidade tradicional de Zacarias (Duarte & Garcia 2024). O projeto do Porto de Jacaré (Terminal Ponta Negra) também é alvo de críticas, sobretudo pelos riscos à geodiversidade local — como os “beachrocks” — e impactos sobre o regime de ondas (Melo 2018).

Maricá abriga uma rica diversidade de fitofisionomias pertencentes ao bioma Mata Atlântica, com destaque para a vegetação de restinga, composta por comunidades halófilas, scrubs, brejos herbáceos, floresta seca e slack (Santos et al. 2017). Outras fitofisionomias relevantes incluem a Floresta Ombrófila Densa, vegetação secundária de regeneração (com espécies como *Mimosa bimucronata* e *Gochmatia polymorpha*), vegetação higrófila em áreas alagadiças e fragmentos florestais em encostas (Maricá 2022).

Esses ecossistemas cumprem papel fundamental na conservação da biodiversidade, incluindo espécies endêmicas e ameaçadas, além de servirem de habitat para aves migratórias e mamíferos (Barbier et al. 2011; Mitsch & Gosselink 2015). Contudo, enfrentam crescentes ameaças decorrentes da urbanização, da agricultura intensiva, da mineração de areia e da ocorrência de incêndios florestais (Duarte & Garcia 2024; Silva et al. 2016; Maricá 2022). As mudanças climáticas intensificam esses riscos, com aumento de temperatura, alterações nos padrões de precipitação e elevação do nível do mar, comprometendo a estabilidade ecológica local (IPCC 2022).

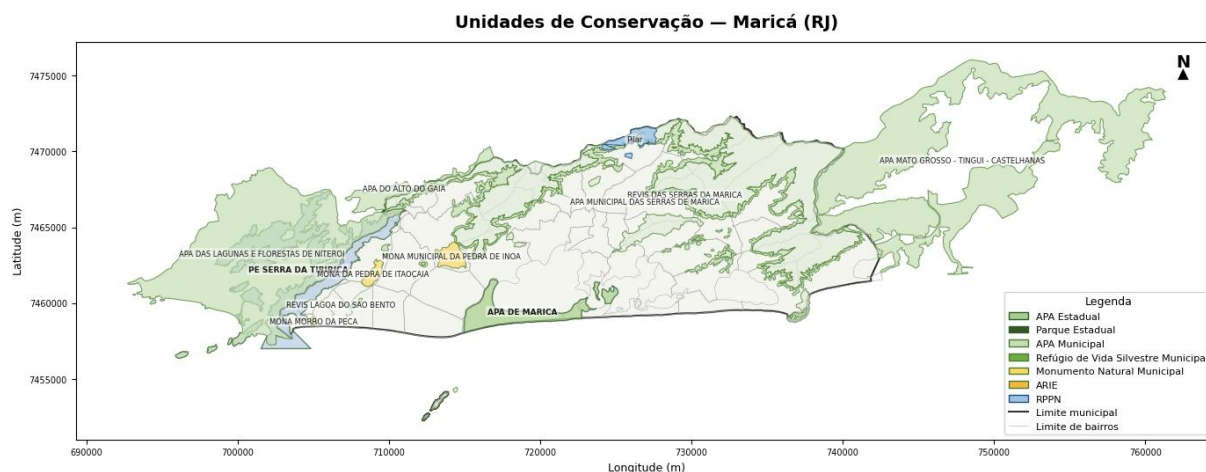


Figura 2 Mapa de localização das Unidades de conservação do Município de Maricá e municípios vizinhos. Fonte: Produzidas pelos autores.

Nesse contexto, considerando a figura 2, o município dispõe de um conjunto significativo de Unidades de Conservação (UCs), que desempenham papel estratégico na preservação de seus ecossistemas. Entre as UCs estaduais, destacam-se a Área de Proteção Ambiental (APA) de Maricá, criada em 1984 para proteger o sistema lagunar e as áreas de restinga, e o Parque Estadual da Serra da Tiririca, instituído em 1991, abrangendo áreas de Maricá, Niterói e São Gonçalo, com foco na conservação da Mata Atlântica e promoção da educação ambiental.

No âmbito municipal, destacam-se o Refúgio de Vida Silvestre Municipal das Serras de Maricá (REVISSERMAR) e a Área de Proteção Ambiental Municipal das Serras de Maricá (APASERMAR), ambas criadas por decretos municipais em 2011, além do Monumento Natural Municipal do Morro da Peça, instituído por decreto municipal em 2017, e o Refúgio de Vida Silvestre Lagoa do São Bento, criado em 2023 (Maricá 2011, 2017, 2022). A Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Cachoeira do Espreado, criada em 2005, protege áreas de significativa importância ecológica e paisagística (Maricá 2005). Também existem iniciativas privadas de conservação, como a Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Pilar e a RPPN MARAEY, esta última em processo de formalização junto ao Instituto Estadual do Ambiente – INEA (INEA 2021).

Essas unidades protegem áreas de restinga, lagoas, serras e fragmentos florestais, contribuindo para a conservação da biodiversidade, a proteção dos recursos hídricos e a promoção de atividades sustentáveis. Estudos acadêmicos reforçam sua relevância, como o de Maciel (2017), que analisa a efetividade da gestão das UCs municipais e destaca a importância do planejamento ambiental adequado para garantir sua função ecológica.

Diante desse cenário, torna-se imprescindível fortalecer a governança ambiental local, implementar medidas de conservação efetivas e incentivar práticas sustentáveis. O envolvimento das comunidades e a educação ambiental são fundamentais para assegurar a proteção das fitofisionomias e dos serviços ecossistêmicos em Maricá.

Processamento GEE

A escolha dos dados e das técnicas de processamento adotadas neste estudo baseou-se em critérios técnicos e operacionais que assegurassem a eficiência, a reprodutibilidade e a adequação ao contexto ambiental do município de Maricá (Pande et al. 2024).

A plataforma Google Earth Engine (GEE) foi selecionada neste estudo por sua infraestrutura computacional baseada em nuvem, que permite o processamento eficiente de grandes volumes de dados



geoespaciais sem a necessidade de armazenamento local (Gorelick et al. 2017). O GEE¹ também oferece acesso direto a coleções históricas de imagens de satélite, como a série Landsat, abrangendo diferentes sensores ao longo do tempo.

Foram utilizadas imagens dos sensores Landsat 5 TM, Landsat 8 OLI e Landsat 9 OLI-2, todos com resolução espacial de 30 metros, cobrindo o período de 1984 a 2024. A seleção das imagens considerou cenas com cobertura de nuvens inferior a 30%, utilizando o campo CLOUD_COVER disponível nos metadados. Além disso, aplicou-se uma máscara de qualidade baseada na banda QA_PIXEL, que identifica e exclui pixels afetados por nuvens, sombras de nuvens, neve ou outros artefatos (USGS 2021). Essa filtragem visa garantir maior precisão na análise das mudanças espectrais da vegetação.

A linguagem de programação Python foi empregada pela sua ampla compatibilidade com bibliotecas de ciência de dados e geoprocessamento, como geopandas, ee, numpy, pandas e matplotlib, viabilizando fluxos integrados de análise vetorial e raster. O acesso à plataforma GEE foi realizado inteiramente via API Earth Engine (ee), que permite operar o ambiente de processamento em nuvem diretamente a partir do Python, sem necessidade de utilização da interface JavaScript nativa do GEE.

O processo de detecção de mudanças na cobertura vegetal foi dividido em 8 etapas principais, descritas a seguir:

Carregamento e Pré-processamento dos Dados

O shapefile do município de Maricá foi carregado e manipulado por meio da biblioteca geopandas (GeoPandas Developers 2020), com reprojeção para EPSG:4326 (WGS84) a fim de garantir compatibilidade com o Google Earth Engine, que adota coordenadas geográficas como padrão. As coordenadas foram então convertidas em um objeto ee.Geometry.MultiPolygon para uso na plataforma, e a autenticação e inicialização da API foram realizadas conforme a documentação oficial do GEE.

Cálculo do NDVI

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi calculado para cada imagem de satélite utilizando a fórmula (Equação 1):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Equação 1: Cálculo de NDVI.

Onde:

- **NIR** é a reflectância na banda do infravermelho próximo.
- **RED** é a reflectância na banda do vermelho.

¹ O acesso ao Google Earth Engine utilizado neste estudo foi realizado por meio de conta não comercial (pesquisa acadêmica), no período de janeiro a junho de 2025. Vale destacar que a plataforma tem passado por mudanças progressivas em sua política de uso gratuito, com redução do poder de processamento disponível para usuários sem conta comercial. Recomenda-se verificar as condições vigentes de acesso em <https://earthengine.google.com> antes de replicar a metodologia aqui descrita.



O NDVI varia entre -1 e 1, onde valores próximos a 1 indicam vegetação saudável e densa, valores próximos a 0 indicam solo exposto ou áreas urbanas, e valores negativos estão associados a corpos d'água (Pettorelli et al. 2005).

Detecção de Mudanças

Diferença de NDVI: A diferença de NDVI entre dois anos foi calculada para identificar mudanças na cobertura vegetal. A fórmula utilizada foi (Equação 2):

$$\Delta NDVI = NDVI_{ano2} - NDVI_{ano1}$$

Equação 1 Diferença de NDVI.

Onde:

- $NDVI_{ano1}$ é o NDVI do ano inicial.
- $NDVI_{ano2}$ é o NDVI do ano final.

Exportação e Vetorização

A visualização dos resultados foi realizada por meio da biblioteca geemap. As imagens classificadas foram exportadas no formato GeoTIFF diretamente para o Google Drive. Posteriormente, as áreas identificadas como perda e ganho de vegetação foram convertidas em polígonos vetoriais utilizando as bibliotecas rasterio e geopandas, possibilitando a sobreposição com unidades territoriais, zonas ecológicas e áreas de proteção ambiental.

O processo metodológico está representado de forma esquemática na Figura 3, contemplando as etapas de entrada de dados, pré-processamento, cálculo do índice, classificação, exportação e análise espacial.

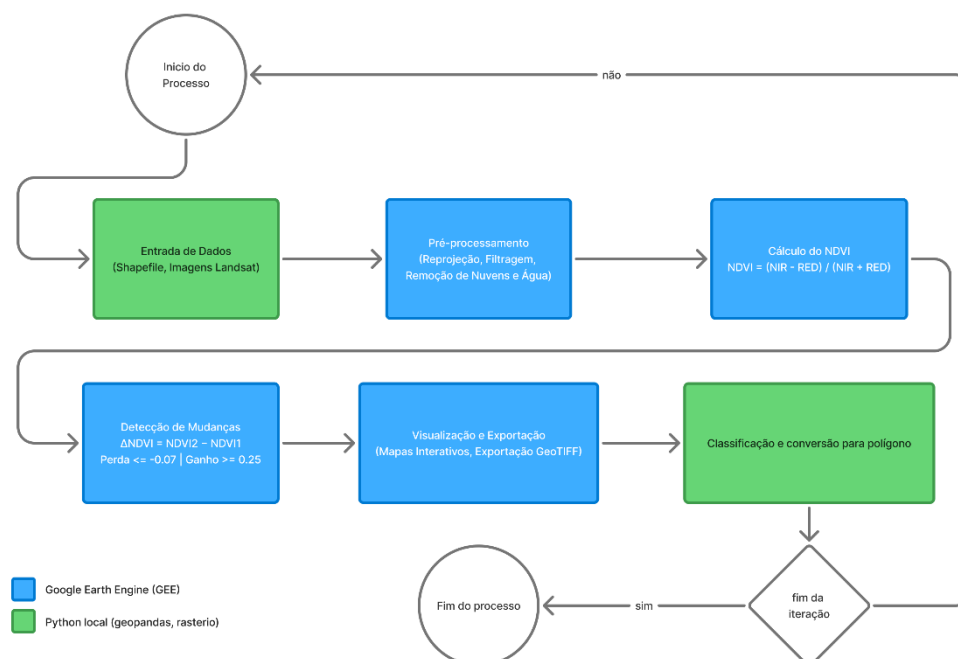


Figura 3 Diagrama do fluxo da detecção de mudança. Fonte: Produzidas pelos autores.



Validação dos Limiares

A validação dos limiares adotados para a classificação das mudanças de NDVI foi realizada por meio de inspeção visual comparativa, procedimento reconhecido como etapa essencial em projetos de detecção de mudanças por sensoriamento remoto (Kennedy et al. 2009; Hemati et al. 2021). Foram coletadas 20 amostras aleatórias dos resultados classificados — 10 de perda e 10 de ganho de vegetação — distribuídas entre os diferentes períodos e regiões do município, as quais foram sobrepostas às imagens Landsat da época correspondente a cada período para verificação da correspondência espacial entre as áreas detectadas e a realidade observada.

Para os períodos em que a disponibilidade de dados permitia, utilizaram-se imagens de sensores com maior resolução espacial, como o Sentinel-2 e o CBERS, priorizando sempre sensores de acesso público e gratuito. Nos demais períodos, a validação foi realizada com imagens do próprio sensor Landsat utilizado na análise, garantindo consistência radiométrica entre as cenas comparadas (Zhu & Woodcock 2014).

A validação por amostragem resultou em uma Exatidão Global de 85%, com acurácia de 100% para a classe de perda de vegetação e 70% para a classe de ganho. Os casos incorretos concentraram-se em áreas de ganho de vegetação, possivelmente associados a variações fenológicas ou regeneração natural de curta duração, o que reforça a necessidade de limiares mais restritivos para essa classe em ecossistemas como os de Maricá (Kennedy et al. 2009; Zhu & Woodcock 2014; Hemati et al. 2021).

Classificação de Mudanças

A definição dos limiares para perda ($\Delta\text{NDVI} \leq -0,07$) e ganho ($\Delta\text{NDVI} \geq 0,25$) de vegetação foi fundamentada em análises exploratórias e testes empíricos realizados com base em séries temporais de imagens Landsat. Inicialmente, consideraram-se os valores amplamente utilizados na literatura ($\Delta\text{NDVI} \leq -0,05$ e $\Delta\text{NDVI} \geq 0,05$), conforme sugerido por Singh (1989) e Kennedy et al. (2009). No entanto, observou-se que tais limiares resultavam em elevada sensibilidade a variações sazonais, especialmente em áreas de vegetação herbácea ou de transição, como as formações de restinga e manguezais (Zhu & Woodcock 2014).

A cobertura vegetal de Maricá é composta por ecossistemas diversos da Mata Atlântica — incluindo restingas, manguezais e florestas ombrófilas — cada um com respostas espectrais distintas e variações sazonais marcantes, o que impõe desafios específicos na definição de limiares únicos de NDVI (Silva & Oliveira 1989; Maricá 2013). Considerando essa complexidade, a adoção de valores mais restritivos teve como objetivo aprimorar a acurácia da detecção de mudanças efetivas, minimizando falsos positivos causados por variações fenológicas naturais ou interferências atmosféricas residuais, aspecto também ressaltado por Inácio et al. (2025) ao apontarem a necessidade de metodologias adaptadas a contextos tropicais e subtropicais.

Além disso, estudos recentes destacam a importância de calibrar os limiares de ΔNDVI de acordo com as características específicas da vegetação e do ambiente local. Hemati et al. (2021) enfatizaram a necessidade de ajustes contextuais nos limiares para melhorar a precisão das análises em estudos com dados Landsat.

Os limiares adotados foram validados por meio de validação visual comparativa, utilizando imagens de maior resolução espacial quando disponíveis e, nos demais períodos, por comparação com imagens da mesma missão Landsat, garantindo consistência radiométrica entre as cenas analisadas (Rouse et al. 1974; Tucker 1979; Pettorelli et al. 2005; Inácio et al. 2025).

Resultados e Discussões

A expansão urbana em municípios litorâneos como Maricá tem se intensificado nas últimas décadas, promovendo alterações significativas na cobertura vegetal. Estudo recente de Duarte e Garcia (2024) demonstra

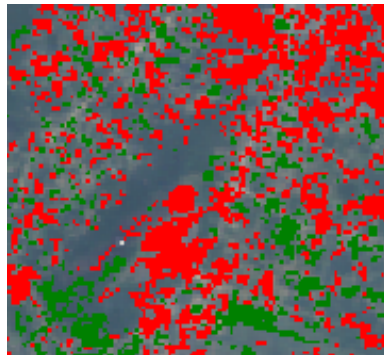
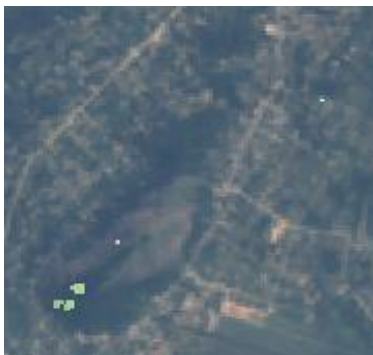


como empreendimentos imobiliários e a ocupação desordenada vêm avançando sobre ecossistemas sensíveis, como áreas de restinga e manguezais, intensificando os conflitos ambientais. Neste contexto, compreender a dinâmica espaço-temporal dessas mudanças torna-se essencial para subsidiar políticas públicas sustentáveis e ações de ordenamento territorial.

Os impactos ambientais associados à urbanização são agravados por eventos climáticos extremos, como a estiagem prolongada registrada em 2023, que contribuiu para a intensificação dos incêndios florestais em áreas de vegetação nativa — colocando Maricá como o município com maior número de focos de calor no estado do Rio de Janeiro naquele ano (INPE 2023).

Validação dos limiares de classificação

Validação dos resultados com NDVI de ≤ -0.05 e ≥ 0.05



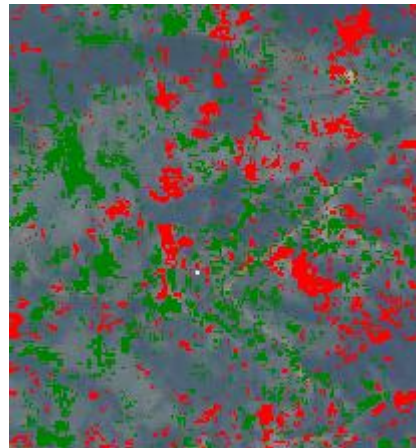
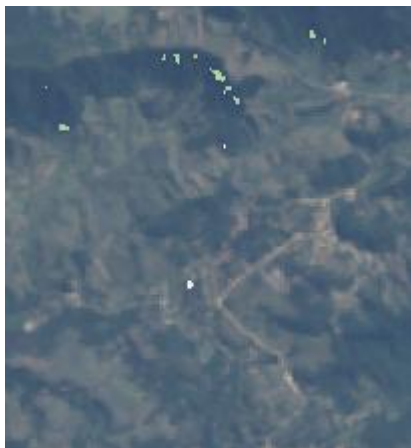
Landsat 2004 distrito de Itaipuaçu

Classificação distrito de Itaipuaçu

distrito

de

Landsat 2008 distrito de Itaipuaçu



Landsat 2004 distrito de Ponta Negra

Classificação distrito de Ponta Negra

Landsat 2008 distrito de Ponta Negra

Figura 4. Detecção de mudanças entre 2004 e 2008 para os distritos de Itaipuaçu e Ponta Negra, com base em Δ NDVI. Foram considerados os limiares convencionais de Δ NDVI $\leq -0,05$ para perda e $\geq 0,05$ para ganho de vegetação. Vermelho: perda de vegetação; Verde: ganho de vegetação. Fonte:

Prozuidas pelos autores.

A validação dos resultados utilizando dois conjuntos distintos de limiares para o índice de diferença de vegetação normalizado (NDVI) - Δ NDVI ≤ -0.05 e ≥ 0.05 , e Δ NDVI ≤ -0.07 e ≥ 0.25 - revelou diferenças significativas na acurácia das classificações de perda e ganho de vegetação, como revela a Figura 4. A aplicação dos limiares mais amplos (± 0.05) resultou em uma superestimação evidente das áreas de mudança, tanto para perdas quanto para ganhos, conforme ilustrado nas classificações dos distritos de Itaipuaçu e Ponta Negra para

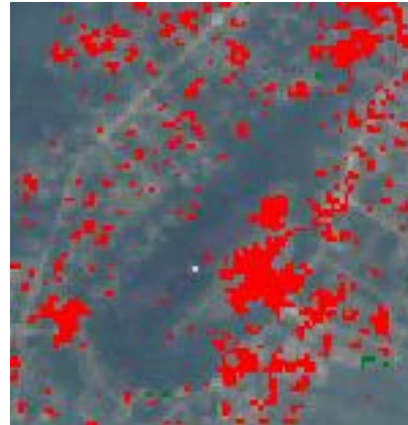


os anos de 2004 e 2008. Nessa abordagem, foi possível observar uma grande quantidade de pixels classificados como alteração, mesmo em áreas que, visualmente, não apresentavam mudanças relevantes na cobertura vegetal, o que sugere a interferência de ruídos espectrais e de variações sazonais.

Validação dos resultados com NDVI de ≤ -0.07 e ≥ 0.25



Landsat 2004 distrito de Itaipuaçu



Classificação distrito de Itaipuaçu



Landsat 2008 distrito de Itaipuaçu



Landsat 2004 distrito de Ponta Negra



Classificação distrito de Ponta Negra



Landsat 2008 distrito de Ponta Negra

Figura 5. Detecção de mudanças entre 2004 e 2008 para os distritos de Itaipuaçu e Ponta Negra, com base em Δ NDVI. Foram considerados os limiares convencionais de Δ NDVI $\leq -0,07$ para perda e $\geq 0,25$ para ganho de vegetação. Vermelho: perda de vegetação; Verde: ganho de vegetação. Fonte:

Produzidas pelos autores.

Em contrapartida, a Figura 4 demonstra que a adoção de limiares mais restritivos (Δ NDVI $\leq -0,07$ para perda e Δ NDVI $\geq 0,25$ para ganho) mostrou-se mais eficaz na detecção de mudanças reais na vegetação, sobretudo em ecossistemas sensíveis como restingas, manguezais e fragmentos de Mata Atlântica. A validação por amostragem confirmou essa eficácia, resultando em uma Exatidão Global de 85%, com acurácia de 100% para a classe de perda e 70% para a classe de ganho (ver item 2.4). Os resultados obtidos apresentaram maior consistência visual com as imagens originais dos sensores Landsat, restringindo a detecção a áreas com alterações mais expressivas e coerentes com a dinâmica ambiental esperada. Essa abordagem contribuiu para uma redução significativa de falsos positivos, conferindo maior robustez à classificação final. Ademais, essa tendência se manteve ao longo de todas as séries temporais analisadas, justificando a adoção dos novos limiares para o processamento dos dados ao longo do estudo.



Apesar da eficácia da metodologia adotada para detectar mudanças na cobertura vegetal no município de Maricá, algumas limitações devem ser consideradas para contextualizar os resultados e orientar estudos futuros. Uma das principais restrições está relacionada à resolução espacial das imagens Landsat, que é de 30 metros. Essa resolução pode não ser suficiente para identificar alterações em pequena escala, como desmatamento seletivo ou regeneração natural em áreas fragmentadas, visto que mudanças sutis tendem a ser diluídas na média espectral do pixel (Pontius & Millones 2011).

Outro fator relevante é a influência de variações sazonais e condições atmosféricas, mesmo com o cuidado na seleção de imagens próximas em termos fenológicos. Fenômenos naturais como a floração, a queda de folhas e interferências atmosféricas (nebulosidade, neblina ou sombras) podem afetar diretamente os valores de NDVI, influenciando a detecção de mudanças (Jensen 2007).

A escolha dos limiares de classificação ($\Delta\text{NDVI} \leq -0,07$ e $\Delta\text{NDVI} \geq 0,25$), embora tenha como objetivo reduzir falsos positivos e aumentar a acurácia dos resultados, pode levar à exclusão de mudanças reais em ecossistemas com resposta espectral mais sutil, como é o caso da vegetação de restinga e manguezais em Maricá (Okoduwa & Amaechi 2024). Esse comportamento pode ser observado na comparação entre os limiares convencionais ($\Delta\text{NDVI} \leq -0,05$ e $\geq 0,05$) e os limiares restritivos adotados neste estudo ($\Delta\text{NDVI} \leq -0,07$ e $\geq 0,25$), ilustrada nas Figuras 4 e 5, que evidenciam a redução de falsos positivos e a maior coerência espacial das mudanças detectadas.

Além disso, é importante destacar que o NDVI, embora amplamente utilizado, apresenta limitações. Ele tende a saturar em áreas de vegetação densa e pode ter baixa sensibilidade em ambientes úmidos ou com vegetação esparsa. Como alternativa, o uso de índices complementares como o EVI (Enhanced Vegetation Index), o SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) ou o NBR (Normalized Burn Ratio) poderia enriquecer as análises e aprimorar a interpretação dos resultados (Pettorelli et al. 2005).

Outro ponto crítico refere-se à conversão dos dados raster para o formato vetorial, uma etapa necessária para a análise espacial detalhada. No entanto, esse processo pode introduzir distorções geométricas, especialmente nas bordas ou áreas de transição, afetando a precisão na delimitação das áreas de perda e ganho (Fisher & Comber 2005).

Por fim, destaca-se a dependência tecnológica da plataforma Google Earth Engine (GEE), cuja infraestrutura e bibliotecas (como geemap, rasterio e geopandas) são essenciais para a execução do método proposto. Alterações futuras na API do GEE, nas bibliotecas utilizadas ou nas políticas de uso da plataforma podem comprometer a reprodutibilidade e a continuidade do processo (Gorelick et al. 2017).

Essas limitações não invalidam os resultados obtidos, mas reforçam a importância de uma interpretação crítica e da possibilidade de complementações metodológicas em estudos futuros, especialmente com validação em campo e uso de múltiplos indicadores espectrais.

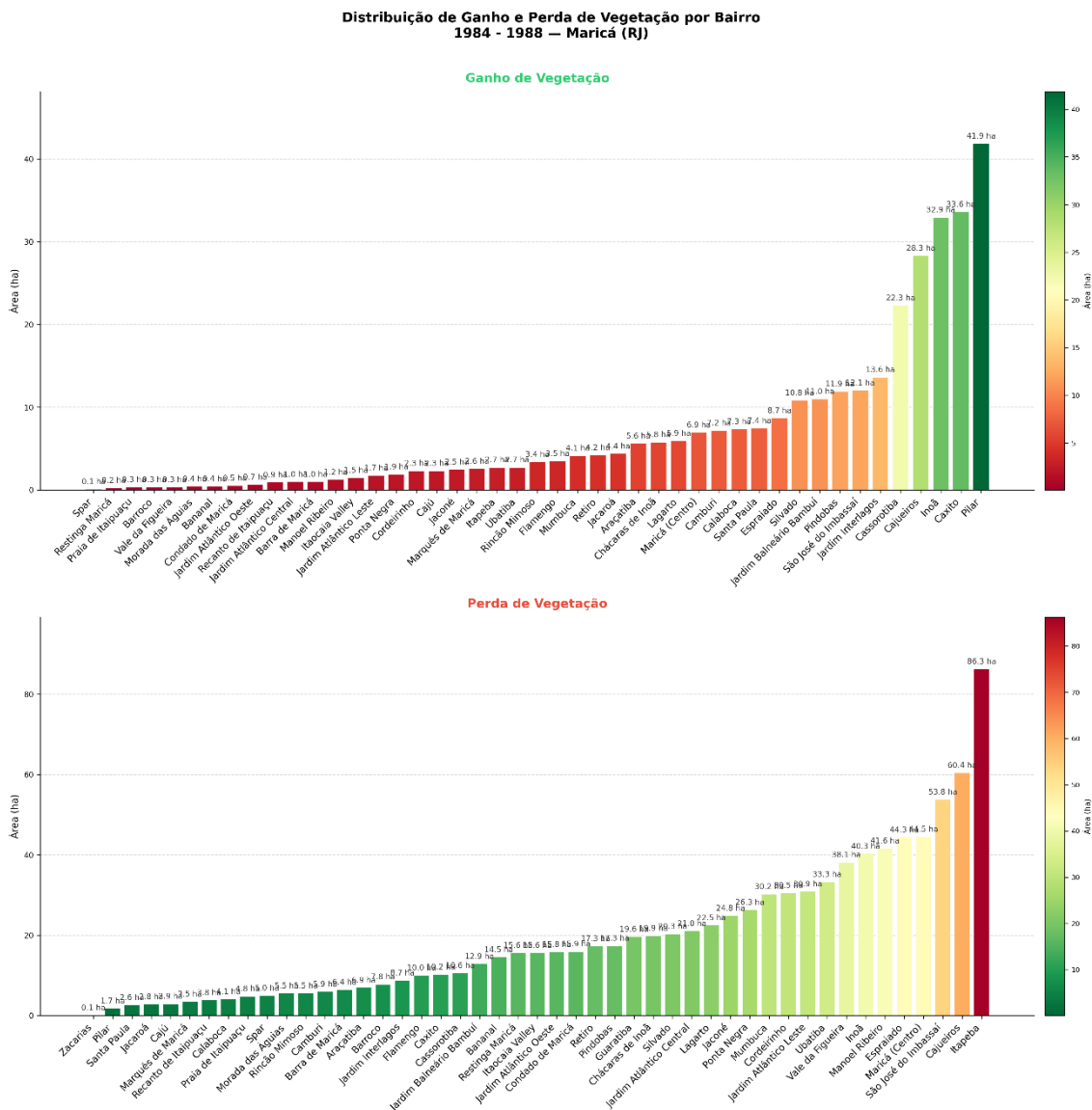
Análise por Período

A análise foi organizada em oito intervalos quinquenais (1984–1988, 1989–1993, 1994–1998, 1999–2003, 2004–2008, 2009–2013, 2014–2018 e 2019–2024), critério detalhado na metodologia (item 2.2). A definição desses recortes temporais baseou-se na disponibilidade e compatibilidade das imagens dos sensores Landsat ao longo do tempo — Landsat 5 TM (1984–2012), Landsat 8 OLI (2013–2020) e Landsat 9 OLI-2 (2021–presente) — garantindo cobertura contínua do município de Maricá ao longo de quatro décadas, com intervalos regulares que permitem comparações temporais consistentes.



1984-1988: Padrão Misto

Este período (1984–1988) apresentou um padrão misto de alterações territoriais, com distribuição relativamente equilibrada entre áreas de ganho e de perda de vegetação. Conforme ilustrado na Figura 6, os ganhos de vegetação foram registrados em todos os bairros analisados, com destaque para Pilar (41,87 ha), que apresentou o maior ganho do período, seguido por Inoã, Flamengo e Itaocaia Valley. Em contrapartida, perdas significativas foram registradas em bairros como Itapeba (86,26 ha), Jardim Atlântico e Cordeirinho, evidenciando os primeiros sinais do avanço da ocupação urbana, especialmente sobre áreas de vegetação remanescente. A alta concentração de perdas em Itapeba, conforme demonstrado no gráfico da direita, reforça sua vulnerabilidade diante da intensificação imobiliária observada ao longo da década de 1980.





indicar um período de estabilização ou de investimentos localizados em infraestrutura urbana e ocupação planejada, ainda que pontual.

Por outro lado, o gráfico de perdas territoriais aponta uma concentração significativa em bairros como Itapeba, que sozinho perdeu 86,26 hectares, seguido por outras regiões com perdas expressivas, como Flamengo e Caxito. Essas perdas podem estar associadas ao avanço da urbanização sobre áreas naturais ou rurais, refletindo uma dinâmica de crescimento urbano ainda incipiente, porém já impactante. A intensidade dessas perdas nos bairros centrais e periurbanos sugere a necessidade de políticas mais firmes de ordenamento territorial, que venham a equilibrar os processos de expansão urbana com a conservação ambiental.

1989-1993: Crise Ambiental

Caracterizado por perdas severas, esse período evidencia o impacto da expansão desordenada como demonstra a tabela 1 evidenciando os bairros de Silvado e Espriado que registraram grandes perdas entre 1989 à 1993:

Tabela 1: Com Maiores Perdas.

Bairro	Perda de área (ha)	%
Espriado	-1.065,58	39,56
Silvado	-786,99	70,85

Fonte (Autores).

A Figura 7 na sequência evidencia um cenário crítico de perdas territoriais entre 1989 e 1993, marcado por uma retração expressiva nas áreas vegetadas, sobretudo nos bairros de Espriado e Silvado, que perderam, respectivamente, 1.065,58 ha e 786,99 ha, conforme destacado na Tabela 1. Essa magnitude de perdas, que ultrapassa os mil hectares, representa cerca de 39,56% para o Espriado e 70,85% para o Silvado em relação a área do bairro, reflete um processo de expansão urbana desordenada, provavelmente impulsionado pela pressão imobiliária, ausência de fiscalização e pela ocupação de áreas ambientalmente sensíveis. Os bairros mais afetados estão localizados em zonas que, tradicionalmente, concentravam grandes extensões de vegetação nativa, o que amplia a gravidade da situação.

Por outro lado, os ganhos de área nesse período foram pontuais e pouco expressivos quando comparados às perdas. Bairros como Lagarto, Espriado e Silvado apresentaram os maiores valores de ganho, embora estes tenham sido muito inferiores às áreas perdidas. O gráfico de ganhos mostra colunas significativamente mais baixas do que o gráfico de perdas, reforçando a assimetria desse momento histórico. Essa discrepância entre ganhos e perdas ilustra não apenas a fragilidade dos processos de recomposição ambiental, mas também a ausência de políticas eficazes de preservação e recuperação da cobertura vegetal durante esse intervalo, consolidando o período como um dos mais impactantes para o território analisado.

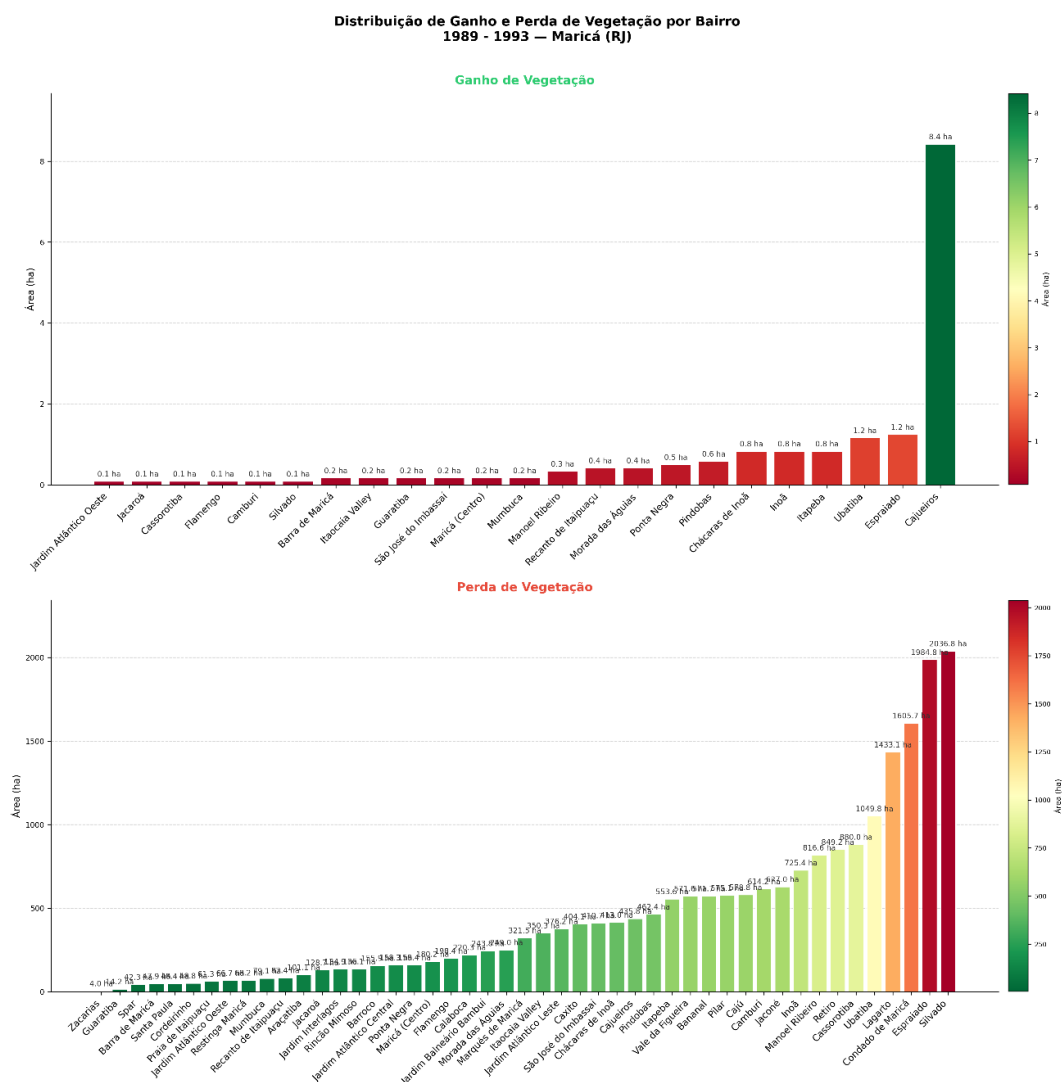


Figura 7. Gráficos de Ganhos e Perdas 1989 a 1993 em Maricá – RJ. Produzidas pelos autores.

Por outro lado, os ganhos de área nesse período foram pontuais e pouco expressivos quando comparados às perdas. Bairros como Lagarto, Espraiado e Silvado apresentaram os maiores valores de ganho, embora estes tenham sido muito inferiores às áreas perdidas. O gráfico de ganhos mostra colunas significativamente mais baixas do que o gráfico de perdas, reforçando a assimetria desse momento histórico. Essa discrepância entre ganhos e perdas ilustra não apenas a fragilidade dos processos de recomposição ambiental, mas também a ausência de políticas eficazes de preservação e recuperação da cobertura vegetal durante esse intervalo, consolidando o período como um dos mais impactantes para o território analisado.

1994-1998: Recuperação Parcial

Assim como mostra a figura 8 houve uma redução na intensidade das perdas e os primeiros sinais de recuperação em bairros como Ponta Negra (+2,31 ha).

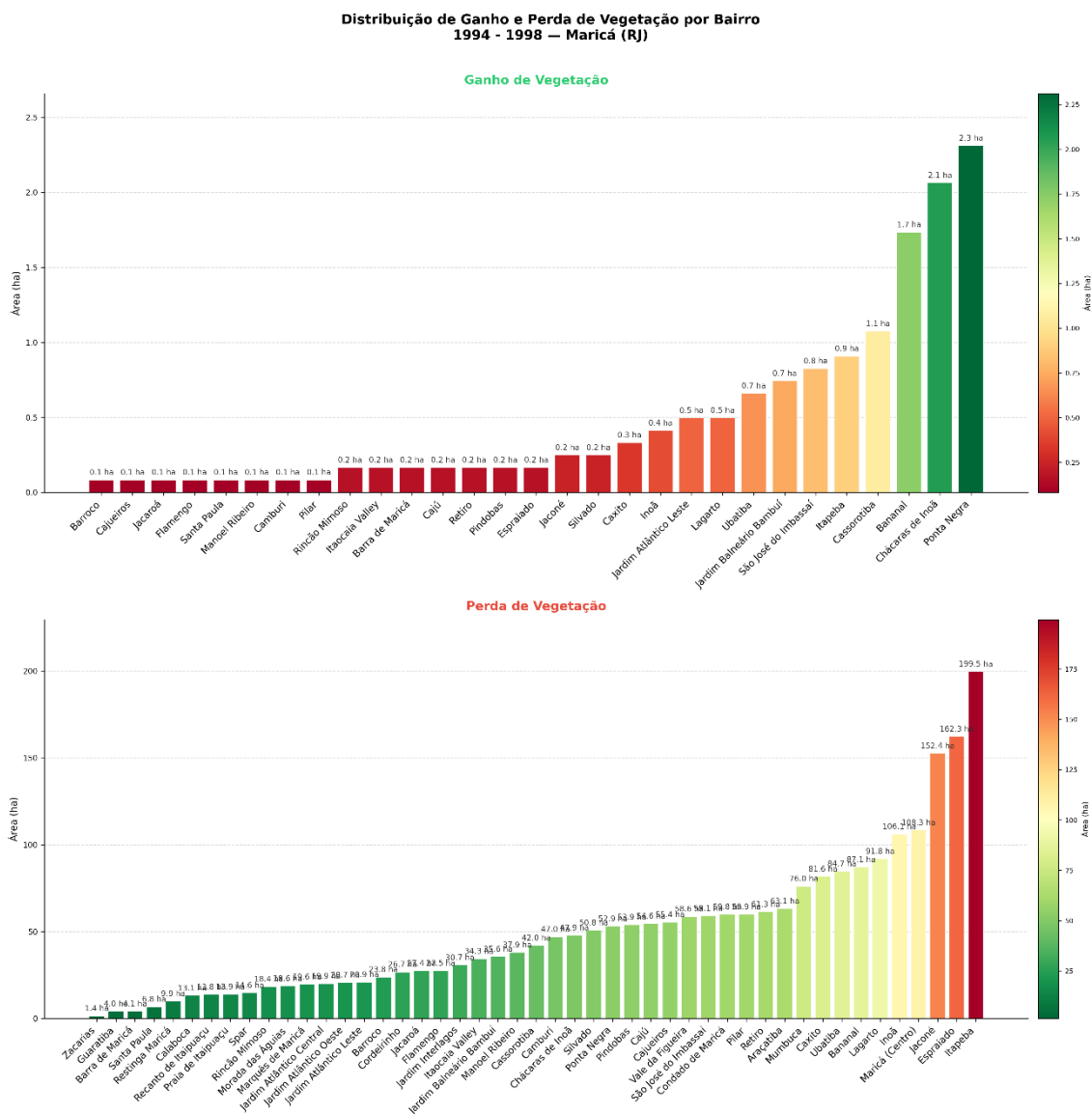


Figura 8. Gráficos de Ganhos e Perdas 1994 a 1998 em Maricá – RJ. Fonte: Produzidas pelos autores.

Durante o período de 1994 a 1998, observa-se uma redução na intensidade das perdas territoriais quando comparado ao intervalo anterior (1989–1993), marcado como “Crise Ambiental”. Os gráficos mostram que, embora ainda tenha havido perdas relevantes, a distribuição dessas perdas é mais equilibrada e menos acentuada nos bairros mais afetados. A maior perda individual ainda ocorre em bairros como Silvado, Espraiado e Cordeirinho, mas em valores visivelmente menores que os registrados no período anterior. Isso indica o início de um processo de estabilização, possivelmente fruto de ações de contenção da expansão urbana ou de um esgotamento de áreas naturais disponíveis para ocupação nos bairros mais vulneráveis.

Paralelamente, nota-se um leve avanço na recuperação ambiental, com destaque para o bairro Ponta Negra, que registrou um ganho de +2,31 hectares — valor pequeno, mas simbólico, diante do contexto anterior de perdas massivas. Bairros como Lagarto, Espraiado e Silvado continuam entre os que mais ganham área, ainda que os valores sejam baixos e insuficientes para compensar as perdas acumuladas. Essa configuração reflete o que pode ser interpretado como uma recuperação parcial, onde a dinâmica urbana segue atuante, mas com menor impacto sobre o meio natural, e onde começam a surgir os primeiros indícios de regeneração da vegetação nativa em determinadas localidades.



2019-2024: Perdas Extremas

O período mais recente trouxe novas perdas significativas, principalmente em bairros de expansão urbana como mostra da tabela 2:

Tabela 2: Maiores perdas no período de 2019 a 2024.

Bairro	Perda de área (ha)	%
Ubatiba	-677,33	68,83
Caxito	-636,04	92,81
Pilar	-607,03	58,06

Fonte (Autores).

A tabela 2 destaca os bairros com as maiores perdas de área no período de 2019 a 2024, evidenciando um processo de intensificação da pressão urbana e ambiental em determinadas localidades. Os bairros Ubatiba (-677,33 ha) cerca de 68% do bairro, Caxito (-636,04 ha) cerca de 92,81% do bairro e Itaocaia Valley (-607,03 ha) cerca de 56,06% do bairro lideram a lista, revelando um cenário crítico de supressão de cobertura vegetal e possível expansão urbana ou rural mal planejada como ilustra a figura 9.

Esse padrão é confirmado pelos gráficos representados na figura 9 de Distribuição de Perda por Área, onde esses bairros se destacam com valores elevados e barras de erro amplas, indicando variações significativas nas perdas locais, que podem estar relacionadas a ações pontuais como loteamentos, expansão de áreas agrícolas ou ocupações irregulares.

No gráfico de ganhos por área, observa-se que embora haja tentativas de regeneração ou recuperação em diversos bairros, como Lagarto, Espraiado e Silvado, os valores são muito inferiores quando comparados às perdas. Essa discrepância mostra que o ritmo de regeneração é insuficiente para compensar o avanço das perdas, o que configura uma situação de desequilíbrio ecológico crescente.

A espacialização desses processos sugere que, enquanto os ganhos se concentram em bairros historicamente rurais ou periféricos, as perdas se acentuam em áreas com alto potencial de urbanização, especialmente no eixo leste da cidade, onde estão localizados Caxito, Pilar e Itaocaia Valley.

Portanto, o período 2019–2024 é marcado por um retrocesso ambiental, com forte perda líquida de vegetação nativa e indícios de expansão urbana desordenada, reforçando a necessidade de políticas públicas de controle territorial e incentivo à recuperação ambiental em áreas críticas.

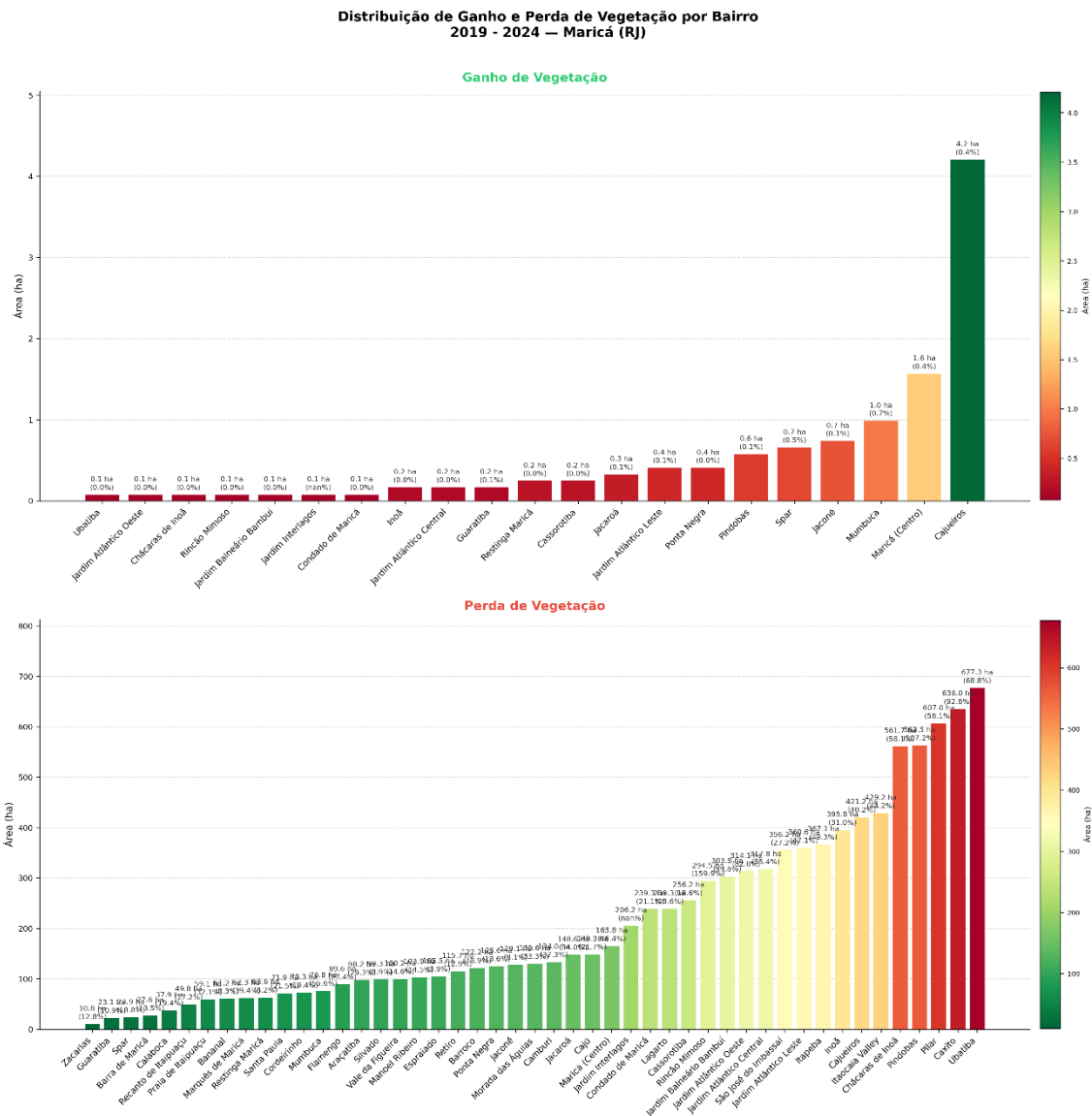


Figura 9. Gráficos de Ganhos e Perdas 2019 a 2024 em Maricá – RJ. Fonte: Produzidas pelos autores.

Transformações Espaciais em Maricá: Dinâmica de Perdas e Ganhos de Vegetação entre 1984 e 2024.

A Figura 8 apresenta abaixo revela uma sequência de mapas que ilustram a distribuição das perdas e ganhos no ecossistema do município de Maricá ao longo de oito períodos quinquenais, entre 1984 e 2024. Cada mapa evidencia a expansão e retração da cobertura vegetal, marcada predominantemente pela cor vermelha (perdas), com alguns pontos de ganhos pontuais (em verde).

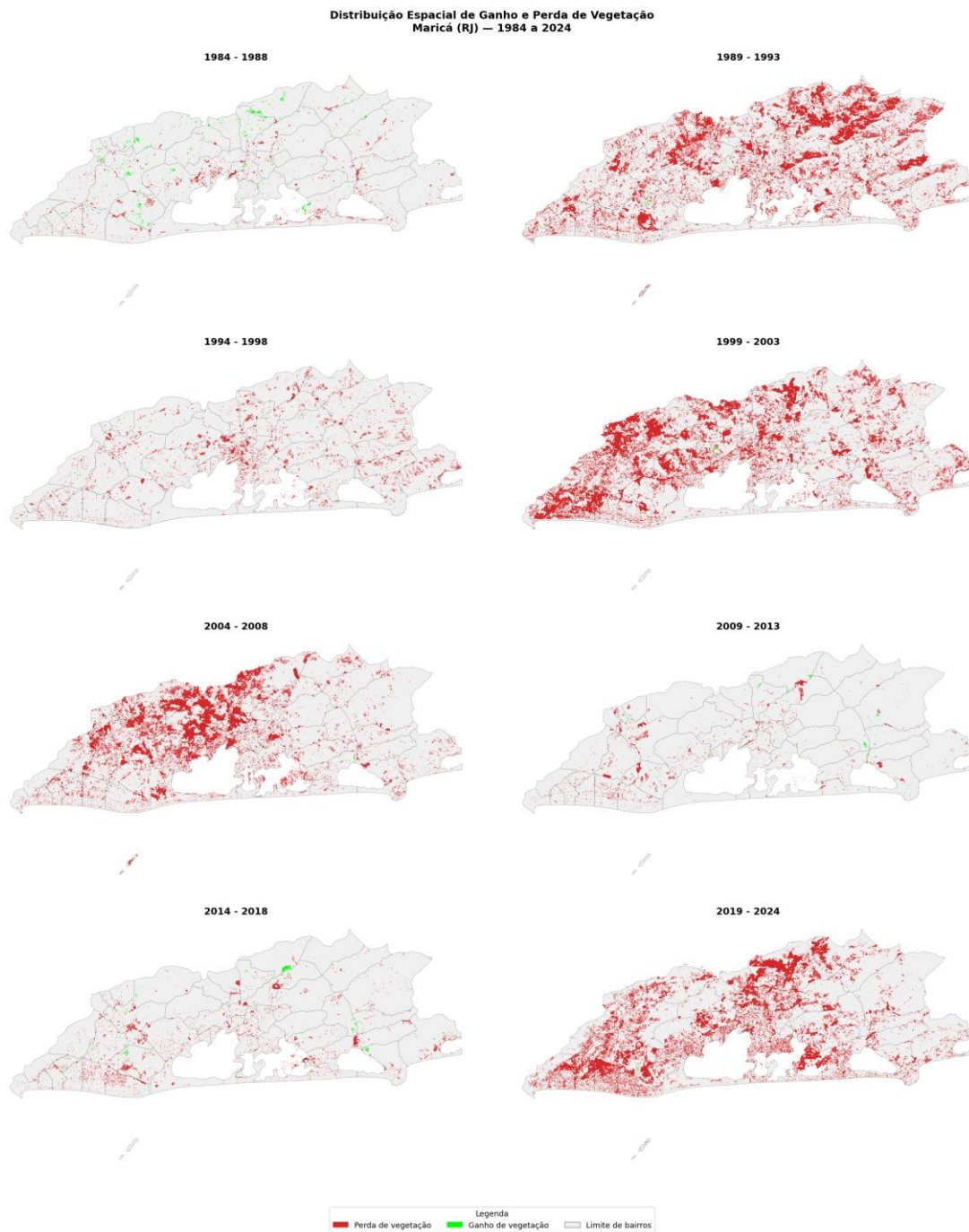


Figura 10. Mapas da Distribuição de Ganhos e Perdas de 1984 a 2024 em Maricá – RJ. Fonte: Produzidas pelos autores.

Observa-se que as transformações territoriais em Maricá não seguem um padrão linear, mas sim uma dinâmica cíclica, marcada por períodos de intensa expansão urbana seguidos de momentos de relativa estabilização. Entre os períodos de 1989–1993, 1999–2003 e 2004–2008, as perdas se intensificam de forma expressiva, indicando um processo agressivo de ocupação do solo, possivelmente impulsionado pela valorização imobiliária, especulação fundiária e ausência de planejamento urbano efetivo.

Já no intervalo de 2009–2013, há uma redução significativa nas perdas, sugerindo um período de contenção ou desaceleração da expansão urbana, o que pode ter relação com políticas de regulação, crises econômicas ou maior controle ambiental. Contudo, essa estabilidade é rompida nos ciclos seguintes, com destaque para 2019–2024, quando os níveis de perda voltam a se acentuar, principalmente em regiões como o leste e sudeste do município, alinhando-se aos dados apresentados anteriormente nos gráficos e tabelas.



Esse padrão demonstra uma vulnerabilidade estrutural no uso e ocupação do solo no município, com ciclos que alternam momentos de pressão antrópica e breves pausas, sem que haja, de fato, uma reversão significativa do processo de degradação ambiental. O mapeamento temporal, portanto, revela a necessidade de intervenções públicas consistentes, planejamento territorial integrado e políticas de recuperação ambiental, especialmente nas áreas que historicamente mais sofreram com a perda de cobertura natural.

O Plano Diretor de Maricá (Maricá 2025) reconhece essas vulnerabilidades e estabelece diretrizes para enfrentá-las. Entre as medidas propostas, destacam-se a adoção de diretrizes bioclimáticas nos parâmetros de parcelamento, uso e ocupação do solo, visando à qualificação ambiental urbana, e a ampliação das áreas verdes para contribuir com o conforto ambiental urbano. Além disso, o plano prevê o desenvolvimento de programas e projetos direcionados à recuperação de áreas degradadas e de matas ciliares dos rios, córregos e canais, bem como a manutenção da permeabilidade do solo.

Quanto as unidades de conservação no território de Maricá, com base na análise detalhada demonstrada abaixo na tabela 3, demonstra quais das Unidades de Conservação (UCs) mais sofreram perdas em Maricá, é possível identificar padrões temporais relevantes quanto à efetividade da criação dessas áreas. Abaixo estão os principais casos, considerando a esfera de gestão, o tipo da UC, o período de maior perda registrada e se essa perda ocorreu antes, depois ou próxima da criação da UC.



Tabela 3: Maiores perdas no período de 2019 a 2024.

Nome	Tutela	Ano de criação	Área	Tipo	Maior Perda	Área Maior Perda	Antes ou depois da criação
AREA DE PROTECAO AMBIENTAL DE MARICA	Estado (Inea)	1984	6.052.546,20	Indefinido	2004 até 2008	3.260.989	Depois
AREA DE PROTECAO AMBIENTAL MUNICIPAL DAS SERRAS DE MARICA	Município (Maricá)	2011	395.679.851,90	Indefinido	1999 até 2003	140.412.367,39	Antes
MONUMENTO NATURAL DA PEDRA DE ITAOCAIA	Município (Maricá)	2017	44.234.696,80	Proteção Integral	2019 até 2024	41.094.905	Depois
MONUMENTO NATURAL MUNICIPAL MORRO DA PECA	Município (Maricá)	2017	10.215.267,33	Proteção Integral	1999 até 2003	10.031.295	Antes
MONUMENTO NATURAL MUNICIPAL PEDRA DE INOA	Município (Maricá)	2017	24.282.618,63	Proteção Integral	1999 até 2003	9.995.135	Antes
PARQUE ESTADUAL DA SERRA DA TIRIRICA	Estado (Inea)	1991	91.364.247,06	Proteção Integral	1999 até 2003	82.817.925	Depois
RPPN Pilar	Particular	2021	53.805.457,05	Indefinido	2019 até 2024	29.659.576	Depois
REFÚGIO DA VIDA SILVESTRE LAGOA DO SAO BENTO	Município (Maricá)	2023	1.423.204,76	Proteção Integral	1999 até 2003	1.395.978	Antes
REFÚGIO DE VIDA SILVESTRE DAS SERRAS DA MARICA	Município (Maricá)	2011	427.540.173,10	Proteção Integral	1989 até 1993	137.456.209,90	Antes

Fonte (Autores).

A análise das Unidades de Conservação (UCs) localizadas em Maricá evidencia uma tendência recorrente de perdas significativas de cobertura vegetal anteriores à formalização legal dessas áreas protegidas. Unidades como o Refúgio de Vida Silvestre das Serras da Maricá e a Área de Proteção Ambiental Municipal das Serras



de Maricá registraram suas maiores perdas nos períodos de 1989 a 1993 e 1999 a 2003, respectivamente, ou seja, antes de suas criações oficiais em 2011. O mesmo padrão é observado em outras UCs municipais, como os Monumentos Naturais da Pedra de Inoã e do Morro da Peça, cujos maiores impactos também ocorreram antes das datas de criação. Esse comportamento sugere uma resposta institucional reativa à degradação ambiental já instalada, o que comprometeu, em alguns casos, a conservação plena dos atributos ecológicos originais.

No entanto, também se verificaram perdas ambientais expressivas, mesmo após a criação de algumas Unidades de Conservação, já devidamente oficializadas. O Refúgio de Vida Silvestre das Serras da Maricá, o Monumento Natural da Pedra de Itaocia, a RPPN Pilar e a Área de Proteção Ambiental de Maricá apresentaram perdas consideráveis mesmo sob a vigência de seus instrumentos legais de proteção. O Parque Estadual da Serra da Tiririca, apesar de ter sido criado em 1991, registrou seu maior impacto em Maricá entre 1999 e 2003, revelando fragilidades no modelo de gestão estadual frente às pressões antrópicas. Situação semelhante é observada no Refúgio da Vida Silvestre Lagoa do São Bento, criado apenas em 2023, mas que já apresenta passivos ambientais acumulados de períodos anteriores.

Esses resultados demonstram que, embora o estabelecimento legal das UCs represente um importante passo para a conservação, ele não garante, por si só, a proteção efetiva dos ecossistemas. A persistência de perdas após a criação das unidades evidencia lacunas na gestão, fiscalização e no planejamento territorial, além de desafios para a integração das ações entre as esferas municipal e estadual. O caso de Maricá ilustra a necessidade de fortalecer as políticas públicas ambientais com mecanismos preventivos, ações de recuperação ambiental e maior participação social, visando aumentar a efetividade da conservação em áreas legalmente protegidas.

Principais Tendências

A análise espacial da cobertura vegetal em Maricá entre 1984 e 2024 revela tendências territoriais marcadas por padrões distintos de perda e ganho, refletindo o impacto da expansão urbana e das políticas de uso e ocupação do solo em diferentes momentos históricos. Um dos períodos mais críticos ocorreu entre 1989 e 1993, quando o município registrou uma intensa aceleração do processo de urbanização. Conforme evidenciado na Tabela 4, os bairros de Silvado, Lagarto e Espraiado apresentaram as maiores perdas territoriais do período, com reduções de 786,99 ha (70,85% da área do bairro), 676,36 ha (66,82%) e 1.065,58 ha (39,56%), respectivamente. Também se destacaram Condado de Maricá (552,22 ha; 48,70%), Camburi (288,13 ha; 80,20%) e Marquês de Maricá (128,37 ha; 81,07%). Esse comportamento está associado à ausência de planejamento urbano eficaz e à conversão desordenada de áreas naturais em loteamentos e empreendimentos imobiliários, em um contexto de políticas de urbanização pouco reguladas (Seabra et al. 2024).

Tabela 4: Perdas devido a expansão urbana

Bairro	Perda de área (ha)
Espraiado	-1.065,58
Silvado	-786,99
Lagarto	-676,36

Fonte (Autores).

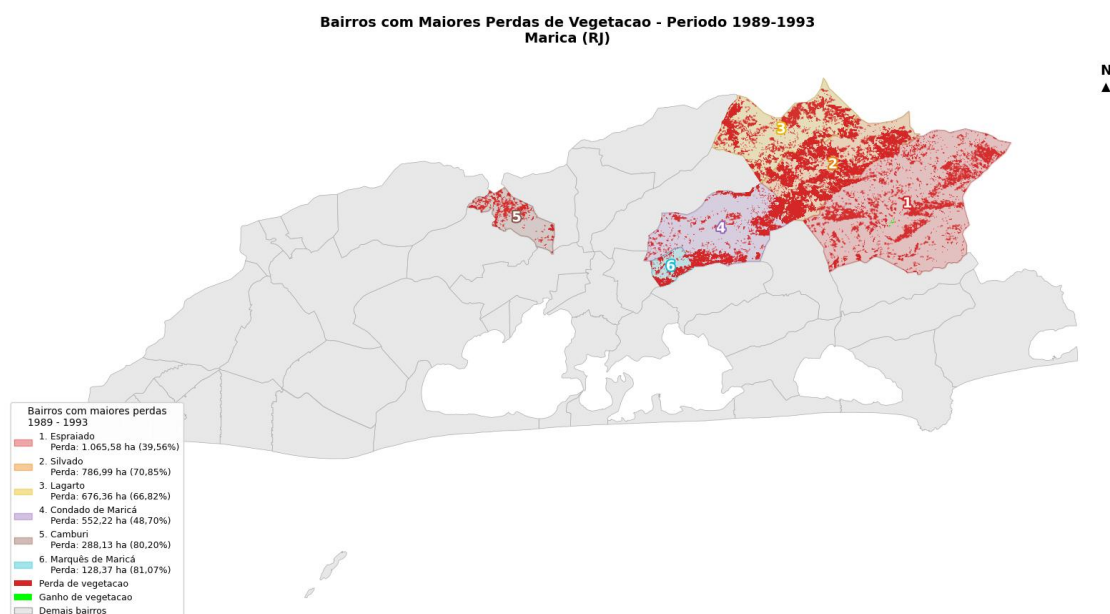


Figura 11. Mapa de Localização e distribuição das perdas e ganhos nos bairros mais atingidos no período de 1989-1993. Fonte: Produzidas pelos autores.

No período recente de 2019 a 2024, a dinâmica de transformação territorial manteve-se intensa, embora com foco em áreas distintas das décadas anteriores. Como apresentado na Tabela 5, os bairros de Pilar (368,49 ha; 35,24% da área do bairro), Cajueiros (333,61 ha; 31,85%), Chácaras de Inoã (309,00 ha; 31,94%) e Ubatiba (277,78 ha; 28,23%) figuraram entre os que mais perderam cobertura vegetal no período. A intensificação dessas perdas está diretamente relacionada à pressão exercida por novos empreendimentos urbanos e à conversão acelerada de áreas rurais em zonas residenciais, reforçando os desafios da expansão urbana desordenada em regiões anteriormente menos ocupadas (Lopes et al. 2024).

Tabela 5: Bairros com maiores dinâmicas de mudança.

Bairro	Perda de área (ha)
Pilar	-368,49
Cajueiros	-333,61
Chácaras de Inoã	-309,00
Ubatiba	-277,78

Fonte (Autores).

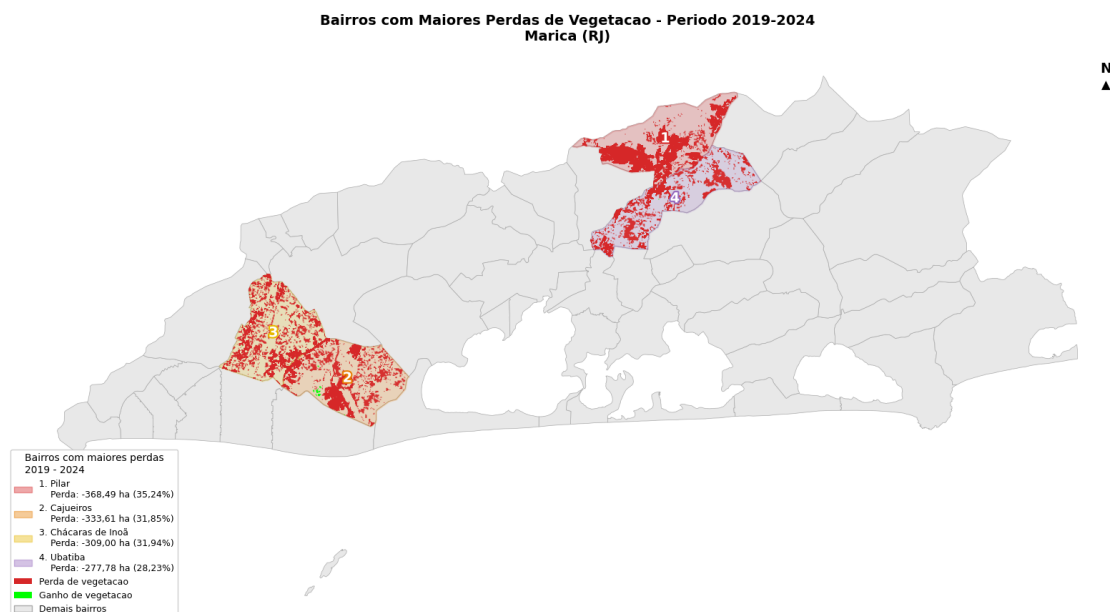


Figura 12. Mapa de Localização e distribuição das perdas e ganhos nos bairros mais atingidos no período de 2019-2024. Fonte: Produzidas pelos autores.

Em contrapartida, o intervalo entre 2014 e 2018 apresentou indícios de estabilização territorial em alguns bairros, com destaque para Pilar, Cajueiros e Ponta Negra. De acordo com a Tabela 6, esses bairros apresentaram os maiores ganhos territoriais do período, com acréscimos de 17,01 ha (1,63% da área do bairro), 13,37 ha (1,28%) e 9,34 ha (1,01%), respectivamente. Vale destacar, no entanto, que esses mesmos bairros também registraram perdas no período — Cajueiros perdeu 74,04 ha e Ponta Negra 25,48 ha — evidenciando uma dinâmica simultânea de degradação e regeneração vegetal. Esses resultados podem ser atribuídos à adoção de instrumentos de planejamento urbano e ambiental eficazes, como a delimitação de zonas de proteção, a implementação de planos diretores e programas de requalificação urbana. A presença de unidades de conservação e áreas de interesse ecológico, aliada à conscientização comunitária e à integração de políticas entre as esferas municipal e estadual, contribuiu para a contenção da degradação e, em alguns casos, para a recuperação de áreas vegetadas.

Tabela 6: Bairros com ganhos consistentes.

Bairro	Ganho de área (ha)
Pilar	+17,01 (2014-2018)
Cajueiros	+13,37 (2014-2018)
Ponta Negra	+9,34 (2014-2018)

Fonte (Autores).

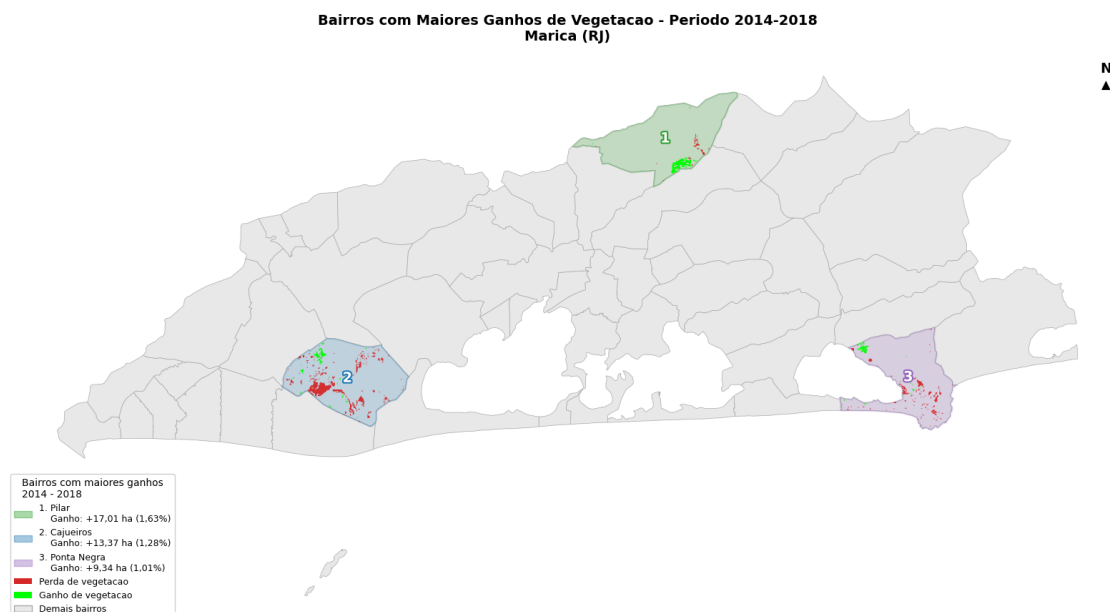


Figura 13. Mapa de Localização e distribuição das perdas e ganhos nos bairros mais atingidos no período de 2014-2018. Fonte: Produzidas pelos autores.

Esses territórios demonstram que, mesmo em contextos de urbanização acelerada, é possível alcançar resultados positivos quando políticas públicas são articuladas com planejamento territorial rigoroso, engajamento social e uso estratégico de tecnologias de monitoramento. No caso de Maricá (Centro), a aplicação do Plano Diretor Municipal pode ter desempenhado papel decisivo na organização do uso do solo. Já em Ponta Negra e Cajueiros, políticas voltadas à requalificação urbana e à preservação ambiental, aliadas à mobilização comunitária, contribuíram para a manutenção da vegetação. A replicação dessas experiências em bairros mais vulneráveis pode ser viabilizada por meio da disseminação de boas práticas, capacitação técnica de gestores públicos e adoção de ferramentas de geotecnologias, promovendo uma gestão territorial mais equilibrada e sustentável (Araújo et al. 2024).

Considerações Finais

Os resultados obtidos demonstram que o município de Maricá passou por intensas transformações na cobertura vegetal entre 1984 e 2024, com destaque para a predominância de perdas em regiões de alto valor imobiliário e ecossistemas sensíveis. Bairros como Silvado, Espriado, Caxito, Pilar e Itaocai Valley figuraram entre os mais impactados, acumulando perdas superiores a 1.500 hectares em alguns períodos. A análise multitemporal por ΔNDVI evidenciou que as principais mudanças ocorreram entre os ciclos de 1989–1993 e 2019–2024, ambos marcados por forte pressão urbanística e expansão desordenada. Em contrapartida, observaram-se ganhos territoriais pontuais em bairros como Cajueiros, Ponta Negra e Maricá (Centro), sugerindo uma dinâmica heterogênea de uso e cobertura do solo e evidenciando a resiliência de certas áreas frente à pressão antrópica.

A aplicação de limiares mais restritivos ($\Delta\text{NDVI} \leq -0,07$ e $\Delta\text{NDVI} \geq 0,25$) mostrou-se mais consistente na redução de detecções espúrias e na delimitação de mudanças mais expressivas na cobertura vegetal, especialmente em áreas com vegetação de restinga e manguezais, cuja resposta espectral tende a ser mais sutil. Essa adequação foi observada por meio da comparação visual com imagens Landsat originais e registros históricos de uso e ocupação do solo. Contudo, ressalta-se que avaliações futuras podem incorporar procedimentos formais de validação quantitativa, como análises de matriz de confusão e estimativas de acurácia, a fim de ampliar a robustez estatística das classificações obtidas.



A pesquisa cumpriu seu objetivo principal ao desenvolver e aplicar uma metodologia sistemática baseada em sensoriamento remoto e análise geoespacial, integrando dados Landsat com o Google Earth Engine e bibliotecas Python (Geemap, Rasterio, Geopandas), para identificar e classificar alterações na cobertura vegetal ao longo de 40 anos. Essa abordagem permitiu não apenas mapear os ciclos de degradação e regeneração, como também gerar insumos técnicos úteis para a gestão ambiental e o planejamento urbano local.

A aplicação de sensoriamento remoto neste contexto revelou-se fundamental para o monitoramento contínuo das transformações territoriais de Maricá, possibilitando a identificação precisa de padrões espaciais de alteração da cobertura do solo. A combinação entre séries temporais de imagens e o uso de ferramentas computacionais modernas mostrou-se eficiente para detectar com clareza as áreas sob maior vulnerabilidade, como os bairros de Pilar, Caxito e Itaocara Valley — verdadeiros hotspots de degradação ambiental.

Apesar dos resultados consistentes, algumas limitações metodológicas devem ser consideradas na interpretação dos dados. A resolução espacial de 30 metros das imagens da série Landsat pode restringir a detecção de mudanças em pequena escala, como desmatamentos seletivos ou processos iniciais de regeneração vegetal em áreas fragmentadas. Além disso, o uso do índice NDVI, embora amplamente consolidado na literatura, apresenta limitações em ambientes com vegetação muito densa ou em áreas úmidas, podendo ocorrer saturação espectral ou menor sensibilidade a variações estruturais da vegetação. Outro aspecto refere-se à adoção de limiares mais restritivos de ΔNDVI , que, embora tenham reduzido a incidência de falsos positivos, podem ter excluído alterações reais com resposta espectral mais sutil. Por fim, fatores como variações fenológicas naturais e interferências atmosféricas residuais também podem influenciar parcialmente os resultados obtidos. Essas limitações não invalidam os achados da pesquisa, mas indicam a importância de complementar futuras análises com índices espectrais adicionais, validação em campo e dados de maior resolução espacial.

Os resultados fornecem subsídios concretos para a reavaliação do zoneamento ambiental do município, incluindo a delimitação de zonas prioritárias para conservação e recuperação da vegetação nativa. A incorporação dessas evidências pode fortalecer a gestão das Áreas de Proteção Ambiental (APAs) e unidades de conservação existentes, além de orientar a criação de novos instrumentos de controle territorial. Recomenda-se o monitoramento periódico dos bairros mais impactados e a replicação de estratégias observadas em áreas resilientes, como Maricá (Centro) e Cajueiros, onde políticas de planejamento urbano e preservação ambiental mostraram-se eficazes.

Essas ações estão alinhadas a importantes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), como o ODS 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), o ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) e o ODS 15 (Vida terrestre), reforçando a necessidade de políticas públicas integradas que conciliem crescimento urbano com proteção ambiental.

Para pesquisas futuras, recomenda-se aprofundar a análise sobre a relação entre a dinâmica imobiliária e os processos de degradação ambiental, especialmente em áreas sob forte especulação fundiária. Também se destaca a importância de desenvolver uma plataforma geoespacial interativa que disponibilize os dados produzidos neste estudo para gestores públicos e sociedade civil. A incorporação de técnicas de inteligência artificial para a detecção automática de mudanças e a priorização de áreas críticas pode ampliar a eficácia das estratégias de monitoramento ambiental baseadas em evidências.

Em termos de desdobramentos científicos, este estudo abre espaço para diversas frentes de investigação. Recomenda-se, por exemplo, o aprofundamento da análise sobre a correlação entre a dinâmica imobiliária e os processos de degradação ambiental, especialmente em áreas sob intensa especulação fundiária. Esse recorte pode ser explorado em futuros trabalhos com foco em variáveis socioeconômicas, produção do espaço urbano e conflitos territoriais.



Outro caminho promissor é o monitoramento contínuo das áreas classificadas como resilientes, a fim de avaliar a efetividade de políticas públicas já implementadas e identificar possíveis processos de regeneração natural. Além disso, propõe-se o desenvolvimento de uma plataforma geoespacial interativa ou portal cartográfico que viabilize o acesso público aos dados produzidos, ampliando o diálogo entre ciência, gestão ambiental e participação social.

Como avanço metodológico, destaca-se o potencial da aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA) para a detecção automática de mudanças e a priorização de áreas críticas. A incorporação de modelos supervisionados ou não supervisionados pode representar uma evolução significativa na agilidade e na precisão do monitoramento territorial, fortalecendo estratégias de gestão ambiental baseadas em evidências.

Essas propostas configuram uma agenda de pesquisa futura que pode resultar em novos artigos científicos, com foco analítico, metodológico e aplicado, contribuindo tanto para o aprofundamento teórico quanto para o aprimoramento da prática de planejamento territorial e conservação ambiental.

Com base nos padrões espaciais identificados, recomenda-se a adoção de medidas práticas para aprimorar a gestão ambiental e o planejamento territorial em Maricá. O monitoramento contínuo das áreas resilientes — como Ponta Negra, Maricá (Centro) e Cajueiros — pode permitir avaliar a efetividade das ações de conservação já implementadas e reforçar iniciativas bem-sucedidas. Também se destaca a importância de desenvolver uma interface gráfica interativa ou portal geoespacial que disponibilize os dados e mapas gerados por este estudo, promovendo a transparência, a educação ambiental e a tomada de decisão informada por parte de gestores públicos e da sociedade civil. Tais estratégias podem ser incorporadas aos instrumentos de planejamento municipal, como o zoneamento ambiental e a atualização de planos diretores, especialmente em bairros que concentram hotspots de degradação.

Do ponto de vista científico, este estudo abre caminhos para pesquisas complementares. Sugere-se o aprofundamento da análise sobre a correlação entre dinâmica imobiliária e degradação ambiental em áreas sob intensa especulação fundiária, considerando variáveis socioeconômicas e legais. Também se propõe a aplicação de técnicas de inteligência artificial para aprimorar a detecção automática de mudanças e a priorização de áreas críticas, como forma de avançar metodologicamente nos processos de monitoramento. A integração entre análise espectral e aprendizado de máquina pode ser explorada em trabalhos futuros, com potencial de gerar artigos dedicados a modelos preditivos ou avaliação de políticas ambientais. Assim, o presente estudo oferece não apenas um diagnóstico robusto, mas também uma base para desdobramentos aplicados e acadêmicos que contribuam com a sustentabilidade territorial de Maricá.

Referências

Araújo RPZ, Campante ALG, Pinheiro CB 2024. Planejamento urbano e a dimensão integradora da questão ambiental: Revisitando instrumentos de política urbana para o enfrentamento da emergência climática. In: Diálogos para uma política nacional de desenvolvimento urbano: Temas transversais à PNDU. Vol. 3, p. 15-38. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), Brasília [cited Jul 2025]. Available from: <https://dx.doi.org/10.38116/978-65-5635-069-1CAPÍTULO1>

Barbier EB, Hacker SD, Kennedy C, Koch EW, Stier AC, Silliman BR 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol Monogr* 81(2):169-193 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>



Dexter Engenharia 2023. Laudo de avaliação de imóvel residencial em Maricá-RJ [cited Jul 2025]. Available from: <https://www.portalbayit.com.br/preview/fba66611-b227-4df1-8ff1-b64cf97097d1.pdf>

Duarte AS, Garcia RC 2024. MARAEY, o paraíso na terra: A APA de Maricá (RJ) como pano de fundo para megaempreendimentos turísticos. In: Anais do Simpósio Nacional de Geografia Urbana – SIMPURB 2024 [cited Jul 2025]. Available from: https://www.sisgeenco.com.br/anais/simpurb/2024/arquivos/GT23_COM_109_417_20240717210017.pdf

Fisher P, Comber A 2005. Approaches to uncertainty in spatial data. In: Foote KE, editor. *Uncertainty in geographical data*. Routledge, London, p. 44-60.

GeoPandas Developers 2020. Geopandas: Python tools for geographic data [homepage on the Internet] [cited Jul 2025]. Available from: <https://geopandas.org>

Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R 2017. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sens Environ* 202:18-27 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Hemati MA, Hasaniou M, Mahdianpari M, Mohammadimanesh F 2021. A systematic review of Landsat data for change detection applications: 50 years of monitoring the Earth. *Remote Sens* 13(20):5359 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.3390/rs13205359>

IBGE 2023. Censo Demográfico 2022: População e Domicílios – Primeiros Resultados. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro [cited Jul 2025]. Available from: <https://censo2022.ibge.gov.br>

Inácio DR, Barboza DV, Vivas Neto DC, Bruno SF 2025. Systematic review on spatial change detection using NDVI in Google Earth Engine. *Rev Gest Soc Ambient* 19(5) [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v19n5-027>

Instituto Estadual do Ambiente – INEA 2021. Parecer técnico nº PRES/COOEAM 26/2021: Processo E-07/002.823/2020 – Empreendimento MARAEY [cited Jul 2025]. Available from: https://www.oeco.org.br/wp-content/uploads/2021/10/md_pesq_documento_consulta_externa.php-1.pdf

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE 2023. Monitoramento de queimadas e incêndios [homepage on the Internet] [cited Jul 2025]. Available from: <http://queimadas.dgi.inpe.br>

IPCC 2022. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1017/9781009325844>

Jensen JR 2007. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, 592 pp.

Kennedy RE, Yang Z, Cohen WB 2009. Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote Sens Environ* 113(7):1382-1396 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.07.018>



Lopes GS, Lobo ALG, Corrêa GG, Oliveira LA, Trindade LA, Cadena MB, Farias MAC, Marques VPF, Neves CE 2024. O sistema GTP (Geossistema-Território-Paisagem) como suporte para a análise socioambiental da Área de Proteção Ambiental de Maricá (RJ). In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Realize Editora [cited Jul 2025]. Available from: https://editorarealize.com.br/editora/anais/sbgfa/2024/TRABALHO_COMPLETO_EV206_MD1_ID157_TB1212_23092024204506.pdf

Maciel BV 2017. *Influência da efetividade de gestão na conservação: o estudo de caso de unidades de conservação municipais em Maricá - RJ* [dissertação]. Universidade Federal Fluminense, Niterói [cited Jul 2025]. Available from: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/9243>

Maricá 2005. Lei Municipal nº 2.122, de 23 de junho de 2005: Criação da Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Cachoeira do Espriado. Maricá (RJ).

Maricá 2011. Lei Municipal nº 2.368, de 16 de maio de 2011: Criação do Refúgio de Vida Silvestre Municipal das Serras de Maricá (REVISSERMAR) e da Área de Proteção Ambiental Municipal das Serras de Maricá (APASERMAR). Maricá (RJ).

Maricá 2013. Plano de Manejo Integrado das Áreas Naturais Protegidas de Maricá. Secretaria de Urbanismo e Meio Ambiente, Prefeitura de Maricá.

Maricá 2017. Lei Municipal nº 2.749, de 17 de agosto de 2017: Criação do Monumento Natural Municipal do Morro da Peça. Maricá (RJ).

Maricá 2022. Diagnóstico Técnico Síntese [cited Jul 2025]. Available from: https://www.marica.rj.gov.br/wp-content/uploads/2022/09/p3_diagnostico_tecnico_sintese_revfinal_11_12.pdf

Maricá 2025. Lei Complementar nº 400, de 17 de janeiro de 2025 [cited Jul 2025]. Available from: https://static.marica.rj.gov.br/arquivos/downloads/transparencia/publicacoes/planos/LEICOMPLEMENTARN400DE17DEJANEIRODE2025REVISAOPLANODIRETOR2_638739284127616714.pdf

Melo GM 2018. *Uma discussão sobre os possíveis impactos ambientais causados pela instalação do Porto de Jaconé no município de Maricá, RJ* [trabalho de conclusão de curso]. Universidade Federal Fluminense, Niterói [cited Jul 2025]. Available from: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/9361>

Mitsch WJ, Gosselink JG 2015. *Wetlands*. 5th ed. John Wiley & Sons, Hoboken [cited Jul 2025]. Available from: <https://books.google.com/books/about/Wetlands.html?id=-vcwBgAAQBAJ>

Nursaputra MA, Larekeng SH, Nasri N, Hamzah AS 2021. The NDVI algorithm utilization on the Google Earth Engine platform to monitor changes in forest density in mining areas. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 739(1):012001 [cited Jul 2025]. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/886/1/012100>

Okoduwa AK, Amaechi CF 2024. MODIS NDVI assessment of forest degradation in the federal capital territory Abuja, Nigeria, Sub Saharan Africa: A case study of the year 2000 – 2022. *Malawi J Sci Technol* [serial on the Internet]. 16(2):66-85 [cited Jul 2025]. Available from: <https://www.ajol.info/index.php/mjst/article/view/282356>



- Pande CB, Srivastava A, Moharir KN, Radwan N, Sidek LM, Alshehri F, Pal SC, Tolche AD, Zhran M 2024. Characterizing land use/land cover change dynamics by an enhanced random forest machine learning model: a Google Earth Engine implementation. *Environ Sci Eur* 36:84.
- Pettorelli N, Vik JO, Mysterud A, Gaillard JM, Tucker CJ, Stenseth NC 2005. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. *Trends Ecol Evol* 20(9):503-510 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pontius RG, Millones M 2011. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *Int J Remote Sens* 32(15):4407-4429 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>
- Rasterio Developers 2020. Rasterio: Geospatial raster I/O for Python programmers [computer software] [cited Jul 2025]. Available from: <https://github.com/rasterio/rasterio>
- Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: Proceedings of the 3rd ERTS Symposium. NASA SP-351, p. 309-317.
- Santos CL, Pereira AM, Silva JF, Oliveira RT 2017. Caracterização das comunidades vegetais na restinga de Maricá, Rio de Janeiro, Sudeste do Brasil. *Rev Tamoios* 13(1):1-14.
- Seabra VS, Cardoso PV, Lopes BM, Firmino WMC 2024. Caracterização das mudanças de uso e cobertura da terra entre 1980 e 2022 em Maricá-RJ. In: Anais do XX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. p. 1-12. Realize Editora.
- Silva JG, Oliveira AS 1989. A vegetação de restinga no Município de Maricá - RJ. *Acta Bot Bras* 3(2):253-266.
- Silva OT 2009. A valorização da terra e a especulação imobiliária: As transformações do mercado de terras urbanas em Niterói, São Gonçalo, Itaboraí e Maricá na nova conjuntura de produção flexível. *Rev Tamoios* 5(1):1-19 [cited Jul 2025]. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/279464457>
- Silva VF, Pereira JS, Cosme AMF, Pessoa DS, Martins WA, Dantas Neto J, Lima VLA 2016. Análise da degradação da vegetação nativa em área de preservação permanente na Paraíba. *Rev Bras Agro Sust* 6(1):54-58.
- Singh A 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *Int J Remote Sens* 10(6):989-1003 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1080/01431168908903939>
- Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, Quackenbush L, Adeli S, Brisco B 2020. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 164:152-170 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
- Tucker CJ 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens Environ* 8:127-150 [cited Jul 2025]. Available from: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Turner BL, Meyer WB 1994. Global land-use and land-cover change: an overview. In: Meyer WB, Turner BL, editors. Changes in land use and land cover: A global perspective. Cambridge University Press, Cambridge, p. 3-10.



USGS – United States Geological Survey 2021. Landsat Collection 2 Level-2 Science Products – Pixel Quality Assessment (QA_PIXEL) [homepage on the Internet] [cited Jul 2025]. Available from: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>

Virtanen P, Gommers R, Oliphant TE, Haberland M, Reddy T, Cournapeau D, Burovski E, Peterson P, Weckesser W, Bright J, van der Walt SJ, Brett M, Wilson J, Millman KJ, Mayorov N, Nelson ARJ, Jones E, Kern R, Larson E, Carey CJ, Polat İ, Feng Y, Moore EW, VanderPlas J, Laxalde D, Perktold J, Cimrman R, Henriksen I, Quintero EA, Harris CR, Archibald AM, Ribeiro AH, Pedregosa F, van Mulbregt P 2020. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat Methods* 17(3):261-272 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>

Zhu Z, Woodcock CE 2014. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sens Environ* 144:152-171 [cited Jul 2025]. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.01.011>