

ANÁLISE DE UMA DÉCADA DA DINÂMICA DE MANGUEZAIS DO ESTUÁRIO DO RIO PARAÍBA: UMA APLICAÇÃO DA FERRAMENTA GEEMMM

Antônio Edmilson de Alcântara Dantas¹ ; Davi de Carvalho Diniz Melo²

RESUMO – O No nordeste do Brasil, os manguezais são ecossistemas de alta relevância ecológica e socioeconômica. Abrigando cerca de 44 mil hectares de manguezais — aproximadamente 4% do total nacional. O uso de geotecnologias como sensoriamento remoto, SIG e plataformas em nuvem como o GEE tem revolucionado a capacidade de mapear e monitorar manguezais com maior precisão e frequência. O GEEMMM é uma metodologia e ferramenta desenvolvida para mapear e monitorar manguezais em qualquer parte do mundo usando a plataforma de computação em nuvem GEE. Sendo assim, o presente trabalho objetiva utilizar a metodologia do GEEMMM para mapear e estimar estatísticas de ocupação da última década (2015 a 2025) sobre a área de manguezal existente no estuário do Rio Paraíba, no entorno do município de João Pessoa. Os resultados do Módulo 3 indicaram área histórica de mangue de 4.231,441 ha e área contemporânea de 4.323,098 ha, correspondendo a aumento líquido de 91,657 ha, ou 2,17% no período analisado. A aplicação do GEEMMM demonstrou potencial para o monitoramento multitemporal de manguezais em ambientes estuarinos, fornecendo produtos úteis para diagnóstico ambiental, planejamento territorial e direcionamento de análises futuras mais detalhadas, incluindo validações em campo e refinamento das amostras de treinamento.

Palavras-Chave – GEE; Mangue; dinâmica

ABSTRACT– In northeastern Brazil, mangroves are ecosystems of high ecological and socioeconomic relevance, covering approximately 44,000 hectares, which corresponds to about 4% of the national total. The use of geotechnologies such as remote sensing, GIS, and cloud-based platforms such as Google Earth Engine (GEE) has greatly improved the ability to map and monitor mangroves with greater accuracy and frequency. GEEMMM is a methodology and tool developed to map and monitor mangroves anywhere in the world using the GEE cloud-computing platform. Therefore, this study aims to apply the GEEMMM methodology to map and estimate land-cover statistics over the last decade, from 2015 to 2025, for the mangrove area located in the Paraíba River estuary, surrounding the municipality of João Pessoa. The results from Module 3 indicated a historical mangrove area of 4,231.441 ha and a contemporary mangrove area of 4,323.098 ha, corresponding to a net increase of 91.657 ha, or 2.17%, over the analyzed period. The application of GEEMMM demonstrated potential for multitemporal monitoring of mangroves in estuarine environments, providing useful products for environmental diagnosis, territorial planning, and the guidance of more detailed future analyses, including field validation and refinement of training samples.

Key-words – GEE; Mangrove; Dynamics

1) Mestrando em Recursos Hídricos: PPGECA Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa – PB, (83)3216-7684, antonio.alcantara@academico.ufpb.br

2) Professor Adjunto: Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, 58051-900 João Pessoa – PB, (83)3216-7684, davi.diniz@academico.ufpb.br

INTRODUÇÃO

Manguezais são ecossistemas costeiros fundamentais para proteção de costas, biodiversidade, pesca, clima e modos de vida tradicionais. O grande volume de pesquisas, programas institucionais e governamentais, e enfoque na manutenção e importância econômica, permite enxergar sua relevância global onde estão concentrados no Brasil e no mundo, como também as principais problemáticas de conservação e uso.

Estes sistemas prestam múltiplos serviços ecossistêmicos, fornecem proteção costeira, reduzindo energia de ondas e impactos de desastres oceânicos (Jia et al. 2023); pesca e maricultura, controle de inundações, sequestro de carbono (Hagger et al. 2022; Owuor et al. 2024); Apoiam o bem-estar de milhões de pessoas; cerca de 120 milhões vivem próximos a grandes manguezais e dependem desses serviços (Hagger et al. 2022). Em termos de extensão e cobertura de área, a maior concentração de manguezais do mundo, cerca de 75% deles encontram-se em 15 países, sendo os maiores a Indonésia, Brasil e a Austrália, em área total (Akram et al. 2023; Jia et al. 2023). No Brasil, os manguezais ocupam mais de 1 milhão de hectares, encontrando-se cerca 80% da concentração na região Norte (nos estados do Amapá, Pará e Maranhão); sendo os manguezais amazônicos representando mais de 700.000 hectares de área (Diniz et al. 2019; Owuor et al. 2024).

Por ocupar extensas regiões do mundo, os manguezais sofreram perdas consideráveis de áreas durante décadas, estima-se que entre 1996 a 2020 aproximadamente 3,4% de área de manguezais foram perdidas (Bunting et al. 2022). Ameaças como a expansão de aquicultura, agricultura e desenvolvimento urbano/industrial, a construção de estradas que facilitam posterior desmatamento, a poluição, eutrofização, os conflitos do uso do solo, falta de fiscalização e governança fraca dificultam a recuperação e a manutenção dessas áreas (Akram et al. 2023; Hagger et al. 2022; Hayashi et al. 2019). No Brasil, os problemas são de natureza similar, embora manguezais sejam Áreas de Preservação Permanente desde 2000, mudanças recentes ampliam brechas (regularização de ocupações e revogação de normas), aumentando risco de conversão (Borges, Ferreira, e Lacerda 2017; Bunting et al. 2022).

No nordeste do Brasil, os manguezais são ecossistemas de alta relevância ecológica e socioeconômica. Abrigando cerca de 44 mil hectares de manguezais — aproximadamente 4% do total nacional — com destaque para áreas nos estados do Maranhão, Pará (região Norte), Bahia e Pernambuco (Diniz et al. 2019). Na Paraíba, estudos detalhados mostram que o estuário do rio Mamanguape possui cerca de 4.620 ha de mangue (2020), com perda acumulada de 2,1% entre 1985-2020 devido principalmente à carcinicultura (criação de camarão), desfolhamento severo e conversão para pastagens (De Lima Freires, Lage-Pinto, e Bernini 2023).

Devido a sua extensão característica, difícil acesso e limitações técnicas e financeiras o monitoramento destes ecossistemas torna-se desafiador (Maurya, Mahajan, e Chaube 2021). O uso de geotecnologias — como sensoriamento remoto, SIG (Sistemas de Informação Geográfica) e plataformas em nuvem como o Google Earth Engine (GEE) — tem revolucionado a capacidade de mapear e monitorar manguezais com maior precisão e frequência (Diniz et al. 2019; Ghorbanian et al. 2021). Dados espaciais abertos são fundamentais para garantir informações atualizadas e acessíveis para pesquisadores, gestores públicos e comunidades locais. Projetos como o Google Earth Engine Mangrove Mapping Methodology (GEEMMM) demonstram avanços significativos na democratização do acesso a ferramentas robustas para o monitoramento global dos manguezais.

O GEEMMM é uma metodologia e ferramenta desenvolvida para mapear e monitorar manguezais em qualquer parte do mundo usando a plataforma de computação em nuvem Google Earth Engine. Ele foi pensado para ser intuitivo e acessível para gestores costeiros não especialistas, removendo barreiras como necessidade de computadores potentes, grande conhecimento em sensoriamento remoto ou programação. O GEEMMM combina imagens Landsat/Sentinel de múltiplas datas, corrige o efeito das marés por meio de um esquema de calibração tidal baseado em índices de água e utiliza o classificador Random Forest para gerar mapas de cobertura de manguezais, sua dinâmica (perda, persistência e ganho) e avaliações de acurácia (Yancho et al. 2020).

Sendo assim, o presente trabalho objetiva utilizar a metodologia do GEEMMM para mapear e estimar estatísticas de ocupação da última década (2015 a 2025) sobre a área de manguezal existente no estuário do Rio Paraíba, no entorno do município de João Pessoa.

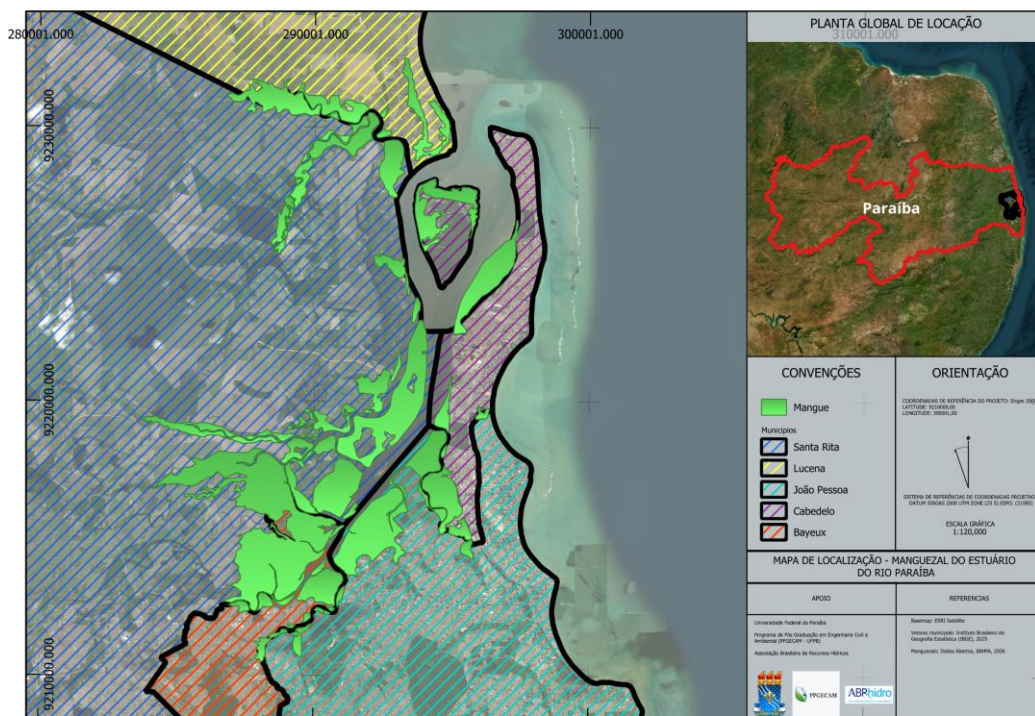
METODOLOGIA

Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho, é a região de manguezal do estuário do Rio Paraíba, na região metropolitana de João Pessoa, Bayeux e Santa Rita (PB), constitui um dos principais sistemas estuarinos tropicais do Nordeste do Brasil, abrigando extensos manguezais e intensa atividade socioeconômica (Cortez, Ribeiro, e Moreira-Santos 2023). Situa-se entre aproximadamente 6°51'–7°08'S e 34°50'W, drenando os municípios de João Pessoa, Bayeux e Santa Rita e desaguando no Atlântico na altura do município de Cabedelo (Alves, Eichler-Barker, e Júnior 2025). O sistema inclui ilhas estuarinas (Stuart, Tiriri e Restinga) e diversos canais e tributários, formando uma complexa rede de ambientes de maré (Nishida e Leonel 1995).

A área de estudo pode ser vista no mapa de localização na figura 1 abaixo, com destaque para regiões de manguezais, e os municípios vizinhos.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



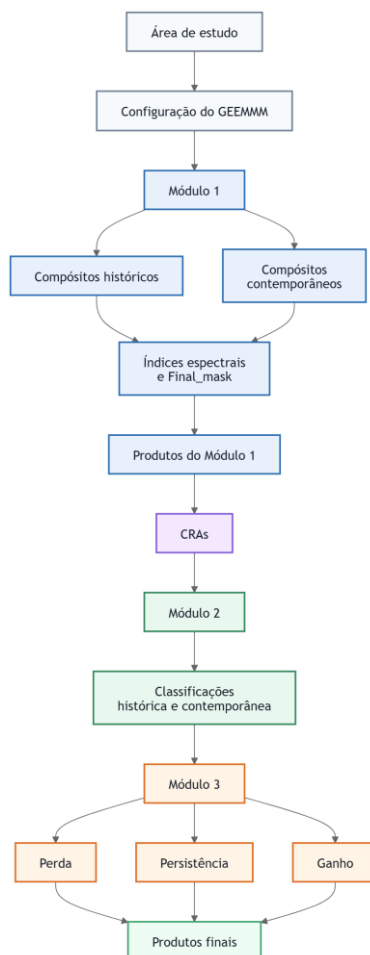
Fonte: Autores, 2026.

Configuração do GEEMMM e preparação dos dados

A análise multitemporal dos manguezais na região de João Pessoa–PB foi conduzida por meio da metodologia Google Earth Engine Mangrove Mapping Methodology — GEEMMM/GEM, executada na plataforma Google Earth Engine (GEE). A metodologia é estruturada em três scripts principais, denominados Módulo 1, Módulo 2 e Módulo 3. O Módulo 1 é responsável pela definição da área de estudo da ferramenta, geração dos compósitos orbitais, cálculo dos índices espectrais usados para identificação de usos do solo, e elaboração da máscara final de processamento; o Módulo 2 realiza a análise espectral das áreas de referência e a classificação supervisionada (Classification Reference Areas – CRA) da cobertura da terra por Random Forest; e o Módulo 3 executa a análise de dinâmica temporal, estimando perda, persistência e ganho da classe de interesse, além de disponibilizar uma etapa opcional de avaliação qualitativa de acurácia — QAA (Blue-Ventures-

Conservation/GEM [2020] 2026). A figura 2 abaixo exemplifica um diagrama simplificado da metodologia do GEEMMM.

Figura 2 – Diagrama de processamento geral do GEEMMM



Fonte: Autores, 2026

Metodologia de mapeamento dos Manguezais

O primeiro módulo do GEEMMM foi utilizado para preparar os dados orbitais e espaciais necessários à classificação. A partir da área preliminar de interesse, o script gerou a área final de foco, selecionou as imagens orbitais correspondentes aos períodos histórico e contemporâneo, produziu compósitos de maré alta e maré baixa, calculou os índices espectrais selecionados e elaborou a máscara final de processamento. Segundo a documentação interna do script, o Módulo 1 gera até quatro compósitos de imagem: maré alta e maré baixa para o período histórico e maré alta e maré baixa para o período contemporâneo, além da máscara final e do polígono da área de foco (Blue-Ventures-Conservation/GEM [2020] 2026).

Inicialmente, foi definida uma área preliminar de interesse no GEE (Region of Interest — ROI), abrangendo o setor costeiro-estuarino de João Pessoa e áreas adjacentes com ocorrência de

manguezais. Essa geometria inicial foi nomeada como “*coarse roi*”, conforme exigido pelo Módulo 1, pois o script utiliza essa área para selecionar os dados orbitais, a linha de costa, a extensão conhecida de manguezais e a área intermaré. A partir dessa delimitação preliminar, o próprio GEEMMM conduz a definição da área final de foco por meio da análise de buffers costeiros e da presença de manguezais conhecidos.

Na configuração inicial do Módulo 1, foram consideradas as bases padrão da metodologia para a extensão conhecida de manguezais, linha de costa e topografia. Assim, a variável “*kmx*” foi mantida como “*null*”, permitindo o uso da base padrão de manguezais conhecidos da ferramenta; a linha de costa foi mantida com “*cst = true*”, utilizando a base padrão do GEEMMM; e a topografia foi mantida com “*topo = true*”, permitindo o uso do modelo topográfico padrão disponível na metodologia. Também foi mantida a exclusão das imagens Landsat 7 posteriores à falha do “Scan Line Corrector”, por meio da variável “*ls7in = false*”, a fim de reduzir a presença de artefatos nas composições orbitais. O próprio script indica que a falha do Landsat 7 pode gerar lacunas em aproximadamente parte da cena, o que pode introduzir artefatos nos compósitos (Blue-Ventures-Conservation/GEM [2020] 2026).

A análise foi organizada em dois períodos temporais: um período histórico e um período contemporâneo. Após testes iniciais com anos isolados, que resultaram em lacunas e pixels sem informação nos compósitos, optou-se por ampliar as janelas temporais para aumentar a disponibilidade de imagens válidas. Dessa forma, foram utilizados os períodos 2015–2016 como janela histórica e 2024–2025 como janela contemporânea. Em ambos os períodos, foram selecionados todos os meses do ano, com o objetivo de maximizar a quantidade de cenas disponíveis e reduzir a ocorrência de áreas sem dados decorrentes de nuvens, sombras ou ausência de observações válidas. Essa decisão foi tomada em razão da elevada nebulosidade típica de áreas costeiras tropicais e da necessidade de gerar compósitos espacialmente mais contínuos.

A seleção de sensores foi controlada automaticamente pelo GEEMMM. Como a janela histórica inicia antes de 2019, o fluxo tende a utilizar imagens Landsat, mesmo com a variável “*forcelandsat = false*”, uma vez que o próprio Módulo 1 informa que o uso de Sentinel-2 é adotado apenas quando os períodos histórico e contemporâneo se iniciam em 2019 ou depois; caso contrário, o padrão é a utilização de Landsat (Blue-Ventures-Conservation/GEM [2020] 2026).

No Módulo 1, também foram definidos parâmetros relacionados à máscara de água e à máscara topográfica. A remoção de pixels de água foi mantida ativada por meio de “*removewater = true*”, associada à opção “*combowatermask = true*”, que considera a máscara combinada entre os períodos histórico e contemporâneo. Para os limites topográficos, foi utilizado “*mangtopo = true*”, permitindo

que o próprio GEEMMM extraísse automaticamente os limiares de elevação e declividade com base na extensão conhecida de manguezais. Essa abordagem foi adotada para restringir a análise às áreas compatíveis com ambientes costeiros e estuarinos, reduzindo a inclusão de áreas topograficamente incompatíveis com a ocorrência de manguezais.

Os índices espectrais utilizados no processamento incluíram os índices sugeridos pela própria metodologia, como MNDWI, CMRI, MMRI e SAVI, além de índices auxiliares de vegetação e água, como NDVI e NDWI, quando disponíveis no conjunto de bandas exportado. O Módulo 1 informa que diferentes índices espectrais podem ser selecionados pelo usuário para auxiliar a classificação, incluindo índices de vegetação, água e índices específicos aplicados ao mapeamento de manguezais (Blue-Ventures-Conservation/GEM [2020] 2026).

O Módulo 2 foi utilizado para realizar a classificação supervisionada da cobertura da terra. Esse módulo utiliza os produtos do Módulo 1, especialmente os compósitos histórico e contemporâneo, a máscara final e a ROI, juntamente com as Classification Reference Areas (CRAs). As CRAs correspondem às áreas amostrais de referência utilizadas para treinar e validar o classificador. O próprio Módulo 2 destaca que as CRAs são o principal dado de entrada da classificação, podendo ser criadas no ambiente do GEE ou externamente e posteriormente carregadas como asset vetorial; cada feição deve possuir um campo numérico e um campo textual associados à classe de cobertura da terra (Blue Ventures Conservation, 2026).

Neste estudo, as CRAs foram elaboradas em um SIG, a partir da interpretação visual dos compósitos orbitais exportados do GEEMMM. Foram utilizadas amostras vetoriais em formato de polígonos, posteriormente exportadas e carregadas nos *Assets* do GEE. As amostras foram organizadas nos campos “*Classvalue*” e “*Classname*”, conforme exigido pelo Módulo 2. A legenda temática adotada foi composta pelas seguintes classes expressas na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Classes de Uso do módulo 2.

Classvalue	Classname
1	Mangue
2	Urbana/Solo Exposto
3	Agricultura
4	Água
5	Vegetação não-mangue

Fonte: Autores, 2026

Foi utilizada uma única base de CRAs para a classificação dos dois períodos, assumindo-se que as amostras selecionadas representam alvos espectralmente confiáveis e interpretáveis nos

compósitos histórico e contemporâneo. No código do Módulo 2, essa condição corresponde ao uso de uma base de referência considerada espaço-temporalmente invariável, aplicada tanto à classificação histórica quanto à contemporânea. O script permite tanto o uso de uma única CRA para ambos os períodos quanto CRAs separadas para cada período, sendo essa escolha controlada pela variável “*classreftype*”.

A classificação foi realizada pelo algoritmo *Random Forest*, um classificador supervisionado baseado em árvores de decisão. No GEEMMM, esse é o classificador implementado no Módulo 2 para geração dos mapas de cobertura da terra. O script também divide aleatoriamente as amostras de referência em 70% para treinamento e 30% para validação, gerando métricas quantitativas de acurácia, como acurácia global de validação, matriz de validação, acurácia de ressubstituição e matriz de ressubstituição. Devido ao extenso processamento do Random Forest, e da amplitude da área de estudo, o parâmetro padrão “*var trees*” que determina o número de árvores de computação foi reduzido de 1.000 para 200, devido a uma exceção de processamento computacional acusada no console do GEE.

O Módulo 3 é o último módulo, e finaliza com a aplicação para calcular a dinâmica espacial dos manguezais entre os períodos histórico e contemporâneo. Essa etapa utilizou como entradas os mapas classificados exportados pelo Módulo 2, isto é, *CombinedClassificationHistoric* e *CombinedClassificationContemporary*, além dos produtos do Módulo 1, como os compósitos, a máscara final e a ROI. O Módulo 3 permite selecionar uma classe de cobertura da terra para análise de dinâmica, podendo ser manguezal ou qualquer outra classe presente nos mapas classificados (Blue Ventures Conservation, 2026). Neste estudo, foi selecionada a classe Mangue, correspondente ao valor numérico 1 no campo “*Classvalue*”. Assim, a variável “*classnos*” foi configurada como: “*classnos = 1*”.

A análise de dinâmica foi executada a partir da comparação pixel a pixel entre o mapa histórico e o mapa contemporâneo. Os pixels classificados como mangue nos dois períodos foram interpretados como persistência; os pixels classificados como mangue no período histórico, mas convertidos para outra classe no período contemporâneo, foram interpretados como perda; e os pixels que não eram mangue no período histórico, mas passaram a ser classificados como mangue no período contemporâneo, foram interpretados como ganho.

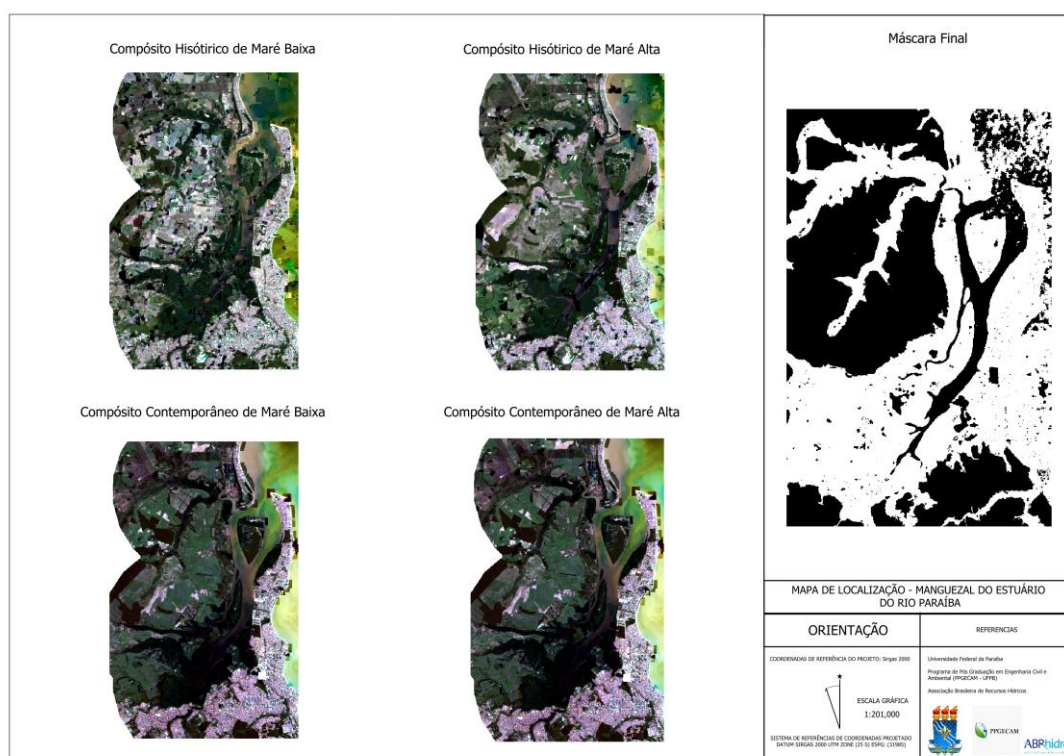
RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os primeiros resultados gerados pela metodologia GEEMMM são as saídas do Módulo 1, que são compostos pelos compósitos do “HOTImghistorical” e “LOTImghistorical” correspondem aos

compósitos histórico de maior e menor maré observável, respectivamente. Já os produtos “*HOTImgcontemporary*” e “*LOTImgcontemporary*” representam os compósitos contemporâneos em condições equivalentes de maré alta e maré baixa. O arquivo “*Finalmask*” representa a máscara final, composta pela integração da máscara de água e da máscara topográfica, enquanto ROI corresponde à área final de interesse utilizada nos módulos subsequentes.

A máscara final foi empregada para limitar a classificação aos pixels considerados válidos. Dessa forma, áreas de água aberta, pixels fora da área de interesse, setores topograficamente incompatíveis ou regiões sem informação válida foram excluídos da análise. No raster classificado, essas áreas podem aparecer posteriormente como valor 0, sendo interpretadas como áreas mascaradas ou não classificadas, e não como uma classe temática. A figura 3 abaixo representa as imagens em raster dos 4 compósitos e da máscara final de água.

Figura 3 – Mapas com compósitos e Máscara Final



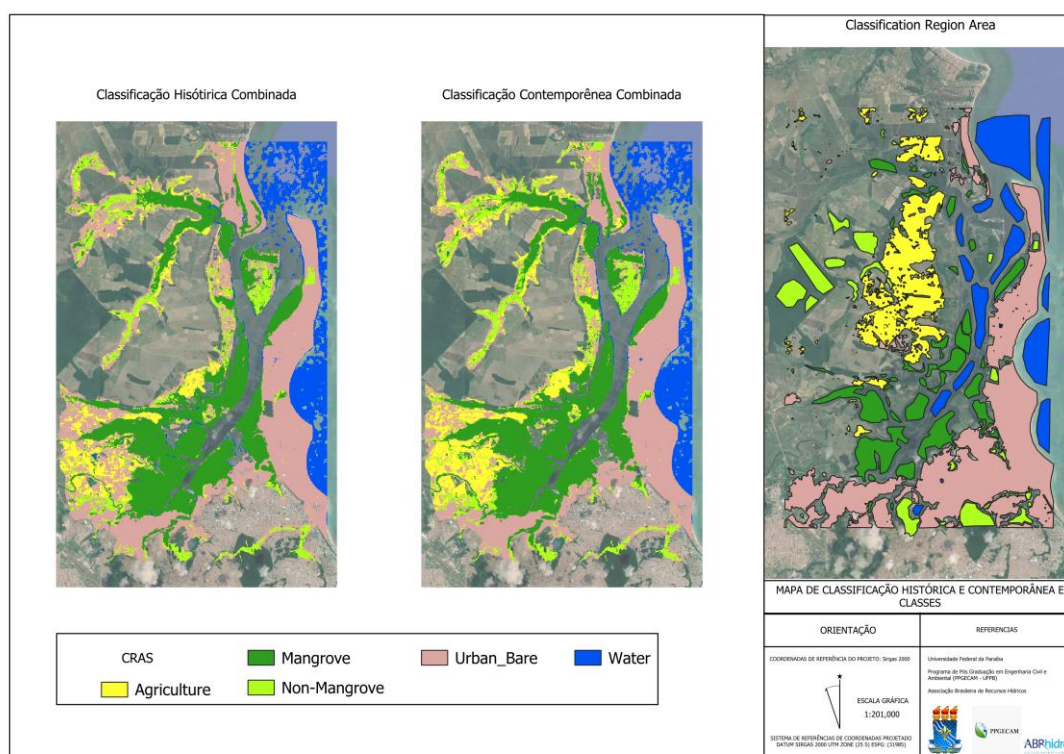
Fontes: Autores, 2026

A saída escolhida no Módulo 2 foi a classificação combinada, isto é, a combinação das informações dos compósitos de maré alta e maré baixa para cada período. Assim, foram gerados dois mapas classificados principais: “*Combined Classification Historic*” e “*Combined Classification Contemporary*”. O primeiro representa a cobertura da terra classificada para o período histórico, enquanto o segundo representa a cobertura da terra classificada para o

período contemporâneo. Cada raster classificado é uma imagem temática de banda única, na qual cada pixel recebe o valor numérico correspondente à classe definida nas CRAs.

O Módulo 2 informa que suas saídas podem variar entre classificações separadas de maré alta, maré baixa ou classificações combinadas para os períodos histórico e contemporâneo (Blue-Ventures-Conservation/GEM [2020] 2026). Foram geradas feições representativas das classes, com tamanhos variáveis a depender da imutabilidade do uso ao longo do tempo, como em regiões de agricultura e de manguezal volumoso, e classes menores de áreas de alta mutabilidade, como em regiões urbanas. Essa variação de tamanho reduziu-se o erro de classificações errôneas significativamente. A figura 4 abaixo, apresenta os mapas de classificação e as classes espacializadas.

Figura 4 – Mapas de classificação histórica e contemporânea e as classes.

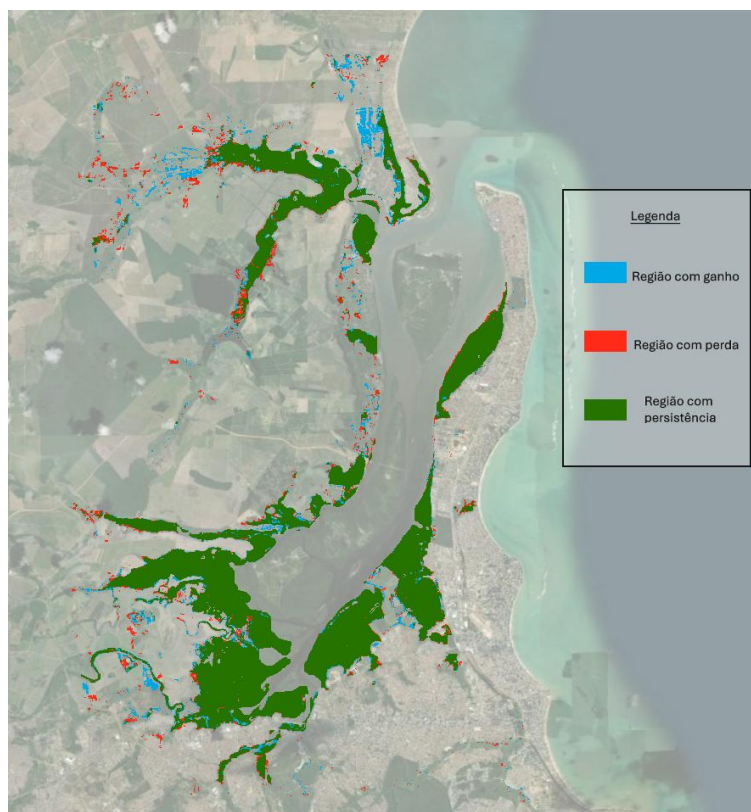


Fontes: Autores, 2026

A aplicação do Módulo 3 da metodologia GEEMMM permitiu quantificar a dinâmica espacial da classe Mangue entre o período histórico e o período contemporâneo, a partir da comparação entre os rasters classificados gerados no Módulo 2. Como produtos principais, foram obtidos três arquivos raster em formato “.tif”, correspondentes às áreas de ganho, perda e persistência de manguezal. Além desses produtos espaciais, o console do Google Earth Engine forneceu estatísticas resumidas de área para cada classe analisada, permitindo avaliar não apenas a variação líquida da classe Mangue, mas

também as principais transições observadas entre as classes mapeadas. A figura 5 abaixo mostra os pixels classificados com ganho, a perda e a persistência do manguezal.

Figura 5 – Pixels classificados com ganho, perda e persistência.



Fonte: Autores, 2026

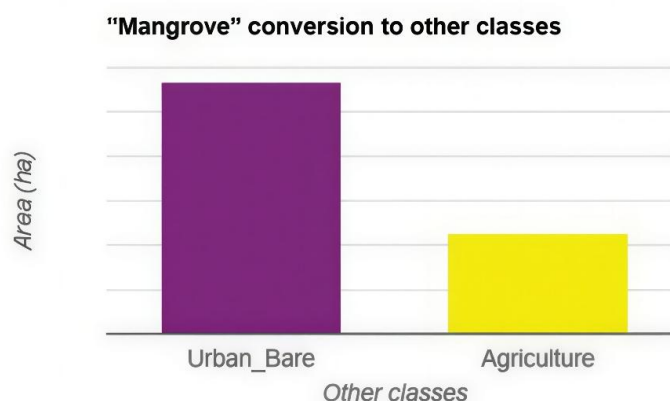
Para a classe Mangue, os valores de área calculados para a área histórica de 4.231,441 ha e uma área contemporânea de 4.323,098 ha, representando um aumento líquido de 91,657 ha, equivalente a 2,17% no intervalo analisado. Apesar desse acréscimo líquido, a análise detalhada revelou que a dinâmica da classe não foi uniforme: foram identificados 388,490 ha de perda, 3.842,951 ha de persistência e 480,147 ha de ganho de manguezal. Em termos relativos, aproximadamente 90,82% da área histórica de mangue permaneceu estável, enquanto 9,18% foram convertida/transferida para outras classes. Estes valores se encaixam levemente na média do estudo de Diniz *et al.* em 2019 sobre comportamento de manguezais, que traçando ganhos e perdas com técnicas de sensoriamento remoto para o período histórico de 1985 a 2018 foram encontrados acréscimos na região brasileira de manguezais de aproximadamente 1%, e uma área estável de manguezais de aproximadamente 75%.

Em termos de ganho, correspondeu a 11,35% da área histórica, superando a perda e resultando no balanço positivo observado. A existência simultânea de áreas de perda e ganho demonstra que o sistema apresenta dinâmica ativa, especialmente em bordas, zonas de transição, margens de canais,

áreas intertidais e setores sujeitos à influência de maré, sedimentação, regeneração vegetal ou pressão antrópica.

A figura 5 abaixo representa o gráfico de transferência de área de manguezal que foram para outras classes, de área urbana/solo exposto ou agricultura.

Figura 6 – Transferência de área de manguezais para outras classes.



Fonte: Autores, 2026

A presença de 388,490 ha de perda de manguezal não deve ser interpretada de forma isolada como supressão direta da vegetação, pois parte dessas áreas pode estar associada a incertezas da classificação, especialmente em regiões de borda entre mangue, água, solo úmido e vegetação não manguezal. Em ambientes estuarinos, a resposta espectral dos alvos pode variar significativamente conforme a maré, a umidade do solo e a composição dos sedimentos expostos. Assim, as áreas classificadas como perda devem ser analisadas.

Por outro lado, os 480,147 ha de ganho de manguezal indicam áreas que não foram classificadas como mangue no período histórico, mas passaram a compor essa classe no período contemporâneo. Esse resultado pode refletir processos de expansão ou regeneração da vegetação de mangue em setores marginais, bancos lamosos estabilizados ou áreas anteriormente classificadas como água, solo exposto ou vegetação não manguezal. Ainda assim, estas regiões intertidais e áreas de transição, como vistos na figura 5 acima podem apresentar grande variabilidade espectral entre os compósitos históricos e contemporâneos. Dessa forma, o raster de ganho deve ser utilizado como base para uma análise espacial qualitativa, verificando se as áreas identificadas são compatíveis com processos ecológicos plausíveis de expansão da vegetação.

A análise das demais classes reforça a necessidade de interpretar os resultados de conversão de forma integrada. A classe ‘Urbano/Solo Exposto’ apresentou redução de 7.559,320 ha no período

histórico para 6.386,332 ha no período contemporâneo, correspondendo a uma variação de -15,52%. Foram registrados 1.887,259 ha de perda, 5.672,061 ha de persistência e 714,271 ha de ganho para essa classe. Já a classe Agriculture apresentou aumento expressivo, passando de 1.290,183 ha para 2.140,125 ha, com variação positiva de 65,88%. Para essa classe, foram identificados 399,118 ha de perda, 891,065 ha de persistência e 1.249,060 ha de ganho.

A forte variação observada para Agriculture e Urban_Bare sugere mudanças importantes nas classes terrestres adjacentes aos manguezais. Contudo, também pode indicar confusão espectral entre classes não prioritárias, especialmente quando a classificação envolve áreas agrícolas, solo exposto, áreas urbanas claras e vegetação não manguezal. Como o objetivo central do estudo é a dinâmica da classe Mangue, as transições envolvendo essas classes devem ser consideradas principalmente como apoio interpretativo, e não como resultado principal. A elevada variação da classe Agriculture, por exemplo, pode estar relacionada tanto a mudanças reais no uso da terra quanto à dificuldade de separação espectral entre vegetação agrícola, vegetação não manguezal e áreas úmidas em diferentes condições sazonais.

Os gráficos de conversão gerados pelo Módulo 3 indicaram transições entre Mangrove, Urban_Bare e Agriculture, tanto no sentido de conversão de mangue para outras classes quanto no sentido de conversão de outras classes para mangue. Esses gráficos são úteis para identificar possíveis trajetórias de mudança, mas devem ser interpretados em conjunto com os mapas raster de perda, persistência e ganho. Quando as conversões ocorrem de forma espacialmente coerente, podem indicar processos reais de alteração da cobertura da terra. Entretanto, quando aparecem distribuídas em pequenos pixels ou manchas descontínuas, podem estar associadas à variabilidade espectral dos compósitos ou à sensibilidade do classificador.

A ocorrência simultânea de perda e ganho de manguezal reforça a importância de analisar a dinâmica espacial, e não apenas a variação líquida da área. Resultado semelhante é discutido por (Santos et al. 2024), que demonstraram que mapas de perda, ganho e estabilidade permitem identificar processos distintos atuando sobre os manguezais, incluindo fatores naturais e pressões antrópicas. Assim, no presente estudo, o aumento líquido da classe Mangue não elimina a presença de áreas localizadas de perda, as quais devem ser avaliadas espacialmente nos rasters de dinâmica.

De modo geral, os resultados indicam que os manguezais da área analisada apresentaram balanço líquido positivo, com ganho superior à perda, mas mantendo uma dinâmica espacial complexa. A persistência de mais de 3.840 ha demonstra que os principais remanescentes de manguezal permaneceram estáveis, enquanto as áreas de ganho e perda revelam mudanças localizadas que merecem análise espacial mais detalhada. Assim, os produtos raster gerados pelo Módulo 3 são

fundamentais para diferenciar o resultado numérico agregado da distribuição espacial das alterações, permitindo identificar setores mais estáveis, áreas de possível regeneração e locais onde a classe mangue foi substituída por outras coberturas.

CONCLUSÕES

Através dos resultados da dinâmica do manguezal analisados na janela temporal estudada, e computada por meio do GEEMMM, é possível concluir que a metodologia foi eficaz em traçar e delimitar regiões estuarinas com manguezais, e obter informações estatísticas básicas da variabilidade espacial e temporal dessas zonas. As principais conclusões deste estudo são:

- A metodologia do GEEMMM foi executada integralmente na plataforma do Google Earth Engine, necessitando apenas de uma ferramenta SIG para criação das CRAs e análises finais dos produtos.
- A ferramenta possui um banco de dados próprio com a delimitação global dos manguezais; topografia; informações de marés. Entrega uma máscara de área otimizada com a região final de processamento de área de interesse para o usuário, removendo áreas não condizentes com a topologia física de manguezais.
- A máscara final gerada pelo Módulo 1 foi importante para restringir a classificação às áreas compatíveis com ambientes costeiros e estuarinos, removendo pixels de água aberta, áreas fora da ROI e setores topograficamente inadequados para ocorrência de manguezais, informações importantes para determinar áreas de interesse gerais para manguezais como também para otimização de análises em ambientes computacionais.
- Ainda assim, o programa pareceu não lidar bem que áreas extensas, devido a atuais atualizações nas limitações de processamento da plataforma do GEE, sendo necessário adequar o código do módulo 2, para reduzir o parâmetro das árvores de decisão para ser possível continuar o processamento, modificação não clara ou documentada na ferramenta o que pode gerar impossibilidade para um usuário não experiente.
- A classificação combinada dos compósitos de maré alta e maré baixa possibilitou gerar mapas temáticos para os períodos histórico e contemporâneo, permitindo representar a classe Mangue e as demais classes de cobertura utilizadas na análise.
- Os resultados do Módulo 3 indicaram área histórica de mangue de 4.231,441 ha e área contemporânea de 4.323,098 ha, correspondendo a aumento líquido de 91,657 ha, ou 2,17% no período analisado.

- Apesar do aumento líquido, a dinâmica espacial da classe Mangue apresentou simultaneamente perda, persistência e ganho, com 388,490 ha de perda, 3.842,951 ha de persistência e 480,147 ha de ganho. A persistência correspondeu a 90,82% da área histórica, indicando estabilidade dos principais remanescentes de manguezal.
- Os rasters finais de perda, persistência e ganho mostraram-se essenciais para interpretar espacialmente a dinâmica dos manguezais, pois o balanço líquido positivo não elimina a existência de áreas localizadas de possível retração ou substituição da classe Mangue.
- As transições entre Mangue, Agricultura, Urbana/Solo Exposto e Vegetação não-mangue devem ser interpretadas com cautela, pois parte das mudanças pode estar associada à variabilidade espectral dos compósitos, à influência da maré e à similaridade entre classes vegetadas e áreas úmidas
- O Módulo 3 permitiu gerar estatísticas e produtos cartográficos finais, porém a etapa opcional de avaliação qualitativa de acurácia (QAA) não foi utilizada como resultado principal, em razão da necessidade de priorizar a análise dos mapas de dinâmica e das estatísticas resumidas.

Adicionalmente, é importante destacar que eventuais imprecisões podem estar associadas à resolução espacial das imagens Landsat, à influência das marés, à presença de áreas intertidais, à separabilidade espectral entre manguezais e outras coberturas vegetadas, bem como à qualidade e distribuição das CRAs. Ainda assim, a aplicação do GEEMMM demonstrou potencial para o monitoramento multitemporal de manguezais em ambientes estuarinos, fornecendo produtos úteis para diagnóstico ambiental, planejamento territorial e direcionamento de análises futuras mais detalhadas, incluindo validações em campo e refinamento das amostras de treinamento.

REFERÊNCIAS

- Akram, H., S. Hussain, P. Mazumdar, Kah-Ooi Chua, T. Butt, e J. Harikrishna. 2023. “Mangrove Health: A Review of Functions, Threats, and Challenges Associated with Mangrove Management Practices”. *Forests*. doi:10.3390/f14091698.
- Alves, Bruna Marinho, Patricia Beck Eichler-Barker, e Miodeli Nogueira Júnior. 2025. “Composition and Spatial Distribution of Benthic Foraminifera from Two Tropical Estuaries (7° S, Brazil)”. *Diversity*. doi:10.3390/d17030142.
- Blue-Ventures-Conservation/GEM. [2020] 2026.
- Borges, Rebecca, A. Ferreira, e L. Lacerda. 2017. “Systematic Planning and Ecosystem-Based Management as Strategies to Reconcile Mangrove Conservation with Resource Use”. *Frontiers in Marine Science* 4. doi:10.3389/fmars.2017.00353.

- Bunting, P., A. Rosenqvist, L. Hilarides, R. Lucas, N. Thomas, T. Tadono, Thomas Worthington, M. Spalding, N. Murray, e L. Rebelo. 2022. “Global Mangrove Extent Change 1996-2020: Global Mangrove Watch Version 3.0”. *Remote. Sens.* 14:3657. doi:10.3390/rs14153657.
- Cortez, Creuza, R. Ribeiro, e M. Moreira-Santos. 2023. “Ecological risk assessment of the Paraíba River estuary (Brazil): Plan for a tier 1 screening phase for the ecotoxicological line of evidence.” *Chemosphere* 139039. doi:10.1016/j.chemosphere.2023.139039.
- De Lima Freires, Jerferson, Frederico Lage-Pinto, e E. Bernini. 2023. “Spatial-temporal distribution of mangrove species in the estuary of the Mamanguape river in the state of Paraíba, Brazil”. *Regional Studies in Marine Science*. doi:10.1016/j.rsma.2023.103166.
- Diniz, C., Luiz Cortinhas, Gilberto Nerino, Jhonatan Rodrigues, L. Sadeck, M. Adami, e P. Filho. 2019. “Brazilian Mangrove Status: Three Decades of Satellite Data Analysis”. *Remote. Sens.* 11:808. doi:10.3390/rs11070808.
- Ghorbanian, A., Soheil Zaghian, R. Asiyabi, M. Amani, A. Mohammadzadeh, e S. Jamali. 2021. “Mangrove Ecosystem Mapping Using Sentinel-1 and Sentinel-2 Satellite Images and Random Forest Algorithm in Google Earth Engine”. *Remote. Sens.* 13:2565. doi:10.3390/rs13132565.
- Hagger, Valerie, Thomas A. Worthington, Catherine E. Lovelock, Maria Fernanda Adame, Tatsuya Amano, Benjamin M. Brown, Daniel A. Friess, Emily Landis, Peter J. Mumby, Tiffany H. Morrison, Katherine R. O’Brien, Kerrie A. Wilson, Chris Zganjar, e Megan I. Saunders. 2022. “Drivers of Global Mangrove Loss and Gain in Social-Ecological Systems”. *Nature Communications* 13(1):6373. doi:10.1038/s41467-022-33962-x.
- Hayashi, S., P. Souza-Filho, W. Nascimento, e M. Fernandes. 2019. “The effect of anthropogenic drivers on spatial patterns of mangrove land use on the Amazon coast”. *PLoS ONE* 14. doi:10.1371/journal.pone.0217754.
- Jia, Mingming, Zongming Wang, Dehua Mao, Chunying Ren, Kaishan Song, Chuanpeng Zhao, Chao Wang, Xiangming Xiao, e Yeqiao Wang. 2023. “Mapping global distribution of mangrove forests at 10-m resolution”. *Science Bulletin* 68(12):1306–16. doi:10.1016/j.scib.2023.05.004.
- Maurya, Khushbu, Seema Mahajan, e N. Chaube. 2021. “Remote sensing techniques: mapping and monitoring of mangrove ecosystem—a review”. *Complex & Intelligent Systems* 7:2797–2818. doi:10.1007/s40747-021-00457-z.
- Nishida, A., e R. Leonel. 1995. “Occurrence, population dynamics and habitat characterization of *Mytella guyanensis* (Lamarck, 1819) (Mollusca, Bivalvia) in the Paraíba do Norte river estuary”. *Brazilian Journal of Oceanography* 43:49–57. doi:10.1590/s0373-55241995000100004.
- Owuor, Margaret, Thuareag Santos, Philip Otieno, Ana de Azevedo Mazzuco, Chima Iheaturu, e Angelo Bernardino. 2024. “Flow of mangrove ecosystem services to coastal communities in the Brazilian Amazon”. *Frontiers in Environmental Science* 12:1329006. doi:10.3389/fenvs.2024.1329006.
- Santos, Juliana Sales dos, André Luís Silva dos Santos, Claudia Klose Parise, Thalita Miriam Santos Furtado, Adilson Matheus Borges Machado, Ulisses Denache Vieira Souza, Leonardo Gonçalves de Lima, Ana Carolina Sousa Santos, Milena da Silva Rocha, e Denilson da Silva Bezerra. 2024. “Loss and Gain in Mangrove Surrounding the Lençóis Maranhense National Park: An Integrated Approach Using Remote Sensing and SIG Data”. *Anuário Do Instituto de Geociências* 47. doi:10.11137/1982-390820244759025.
- Yancho, J., T. Jones, Samir Gandhi, C. Ferster, Alice Lin, e Leah Glass. 2020. “The Google Earth Engine Mangrove Mapping Methodology (GEEMMM)”. *Remote. Sens.* 12:3758. doi:10.3390/rs12223758.