

CLASSIFICAÇÃO POR RANDOM FOREST DA OCUPAÇÃO URBANA E TRANSFORMAÇÃO DE DUNAS EM ÁREAS COSTEIRAS TROPICAIS

MARIANY FERREIRA DE SOUSA

Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR - Universidade Federal do Ceará
Email: sousamarianyf@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9034-9051>

LIDRIANA DE SOUZA PINHEIRO

Instituto de Ciências do Mar - LABOMAR - Universidade Federal do Ceará
Email: lidriana@ufc.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0863-0771>

Recebido:01/26

Avaliado:02/26

Publicado:03/26

RESUMO

A Praia do Futuro (PF) e a Sábua (SB), em Fortaleza (CE), apresentam dinâmicas distintas de ocupação urbana e pressão ambiental. Enquanto a PF sofre intensa pressão antrópica com urbanização consolidada, a SB está inserida em uma Área de Proteção Ambiental (APA), o que limita parcialmente a expansão urbana e protege sistemas sensíveis, como dunas e manguezais. Este estudo analisou a expansão urbana e seus impactos sobre as dunas entre 1994 e 2025, utilizando imagens Landsat e classificação supervisionada por Random Forest, com base em amostras previamente delimitadas manualmente nas classes dunas/areia, manguezal, solo exposto, vegetação e construção urbana. O modelo apresentou alto desempenho na PF e moderado na SB, refletindo diferenças de heterogeneidade espacial. Os resultados indicaram expansão urbana mais intensa e densificação na PF, acompanhada de redução significativa das dunas, enquanto na SB a ocupação foi mais dispersa, mas a redução das dunas mostrou forte correlação com a urbanização, evidenciando maior sensibilidade ambiental. Concluiu-se que regiões urbanizadas apresentam degradação acelerada, enquanto áreas protegidas exigem políticas de planejamento e conservação costeira para mitigar impactos sobre ecossistemas sensíveis.

Palavras-chave: Ocupação urbana; Duna; Área de Proteção Ambiental; Random Forest; Sensoriamento Remoto.

RANDOM FOREST CLASSIFICATION OF URBAN OCCUPATION AND DUNE TRANSFORMATION IN TROPICAL COASTAL AREAS

ABSTRACT

Praia do Futuro (PF) and Sábua (SB), located in Fortaleza (CE), exhibit distinct dynamics of urban occupation and environmental pressure. While PF is subject to intense anthropogenic pressure associated with consolidated urbanization, SB is situated within an Environmental Protection Area (EPA), which partially restricts urban expansion and safeguards sensitive systems such as dunes and mangroves. This study analyzed urban expansion and its impacts on dune environments between 1994 and 2025 using Landsat imagery and supervised classification based on the Random Forest algorithm, supported by manually defined training samples for the classes dunes/sand, mangrove, exposed soil, vegetation, and urban construction. The classification model demonstrated high performance in PF and moderate performance in SB, reflecting differences in spatial heterogeneity. The results indicated more intense urban expansion and densification in PF, accompanied by significant dune reduction. In SB, although urban occupation was more dispersed, dune reduction showed a strong correlation with urbanization, highlighting greater environmental sensitivity. The study concludes that urbanized areas experience accelerated degradation processes, whereas protected areas require effective planning and coastal conservation policies to mitigate impacts on fragile ecosystems.

Keywords: Urban occupation; Dunes; Environmental Protection Area; Random Forest; Remote Sensing.

CLASIFICACIÓN MEDIANTE RANDOM FOREST DE LA OCUPACIÓN URBANA Y TRANSFORMACIÓN DE DUNAS EN ÁREAS COSTERAS TROPICALES

RESUMEN

La Praia do Futuro (PF) y la Sabiaguaba (SB), ubicadas en Fortaleza (CE), presentan dinámicas diferenciadas de ocupación urbana y presión ambiental. Mientras que la PF está sometida a intensa presión antrópica derivada de una urbanización consolidada, la SB se encuentra inserta en un Área de Protección Ambiental (APA), lo que limita parcialmente la expansión urbana y protege sistemas sensibles como dunas y manglares. Este estudio analizó la expansión urbana y sus impactos sobre los ambientes dunares entre 1994 y 2025 mediante imágenes Landsat y clasificación supervisada utilizando el algoritmo Random Forest, con base en muestras de entrenamiento delimitadas manualmente para las clases dunas/arena, manglar, suelo expuesto, vegetación y construcción urbana. El modelo de clasificación presentó alto desempeño en la PF y desempeño moderado en la SB, reflejando diferencias en la heterogeneidad espacial. Los resultados evidenciaron una expansión urbana más intensa y procesos de densificación en la PF, acompañados de una reducción significativa de las dunas. En la SB, aunque la ocupación urbana fue más dispersa, la reducción de las dunas mostró una fuerte correlación con la urbanización, indicando mayor sensibilidad ambiental. Se concluye que las áreas urbanizadas experimentan procesos acelerados de degradación, mientras que las áreas protegidas requieren políticas eficaces de planificación y conservación costera para mitigar impactos sobre ecosistemas frágiles.

Palabras clave: Ocupación urbana; Dunas; Área de Protección Ambiental; Random Forest; Teledetección.

CLASSIFICATION PAR RANDOM FOREST DE L'OCCUPATION URBAINE ET DE LA TRANSFORMATION DES DUNES DANS LES ZONES CÔTIÈRES TROPICALES

RÉSUMÉ

Praia do Futuro (PF) et Sabiaguaba (SB), situées à Fortaleza (CE), présentent des dynamiques distinctes d'occupation urbaine et de pression environnementale. Alors que PF subit une forte pression anthropique liée à une urbanisation consolidée, SB est intégrée dans une Aire de Protection Environnementale (APE), ce qui limite partiellement l'expansion urbaine et protège des systèmes sensibles tels que les dunes et les mangroves. Cette étude a analysé l'expansion urbaine et ses impacts sur les environnements dunaires entre 1994 et 2025 à partir d'images Landsat et d'une classification supervisée utilisant l'algorithme Random Forest, basée sur des échantillons d'entraînement définis manuellement pour les classes dunes/sable, mangrove, sol exposé, végétation et zones urbaines. Le modèle de classification a montré une performance élevée pour PF et modérée pour SB, reflétant des différences d'hétérogénéité spatiale. Les résultats indiquent une expansion urbaine plus intense et des processus de densification à PF, accompagnés d'une réduction significative des dunes. À SB, bien que l'occupation urbaine soit plus dispersée, la réduction des dunes présente une forte corrélation avec l'urbanisation, soulignant une plus grande sensibilité environnementale. L'étude conclut que les zones urbanisées connaissent des processus de dégradation accélérés, tandis que les zones protégées nécessitent des politiques efficaces d'aménagement et de conservation côtière afin d'atténuer les impacts sur les écosystèmes fragiles.

Mots-clés: Occupation urbaine; Dunes; Aire de Protection Environnementale; Random Forest; Télédétection.

INTRODUÇÃO

As zonas costeiras configuram-se como ambientes de elevada complexidade e dinamismo, caracterizadas pela interação contínua entre processos naturais e atividades antrópicas. Esses espaços concentram ecossistemas de alta biodiversidade e desempenham funções ambientais essenciais, como a proteção da linha de costa, a manutenção da dinâmica sedimentar e a provisão de serviços ecossistêmicos. Paralelamente, apresentam forte atratividade para a ocupação humana, o que resulta em intensos conflitos entre conservação ambiental e usos urbanos, especialmente em contextos de crescimento populacional acelerado e planejamento territorial insuficiente (Brommer; Bochev-Van Der Burgh, 2009; Moraes, 2007; Polette; Silva, 2018).

No Brasil, o processo de urbanização das áreas costeiras ocorreu em grande parte sem o suporte de instrumentos eficazes de ordenamento territorial, favorecendo a ocupação de ambientes frágeis e intensificando pressões sobre os sistemas naturais. Entre os principais impactos estão a supressão da vegetação nativa, a impermeabilização do solo, a alteração da

dinâmica hidrossedimentar e o aumento da vulnerabilidade ambiental (Moraes, 2007; Diegues, 2008). Essa problemática torna-se ainda mais relevante quando se manifesta em áreas legalmente protegidas, como as Unidades de Conservação, regulamentadas pela Lei Federal nº 9.985/2000.

Dentre essas, destacam-se as Áreas de Proteção Ambiental (APAs), que permitem a coexistência entre conservação e uso sustentável dos recursos naturais, abrangendo tanto terras públicas quanto privadas (Brasil, 2000). Apesar de seus objetivos, proteger a biodiversidade, ordenar o uso do solo e promover o desenvolvimento sustentável; as APAs frequentemente enfrentam fragilidades institucionais, insuficiência de fiscalização e fragmentação da gestão, o que compromete sua efetividade e favorece ocupações incompatíveis com a sensibilidade ambiental (Diegues, 2008; Drummond; Franco; Oliveira, 2010).

Inserida no litoral leste do município de Fortaleza (CE), a Praia da Sabiaguaba se estende por cerca de 7 km, entre as coordenadas 3°49'24"S, 38°24'07"W e 3°46'20"S, 38°26'02"W. O local representa um exemplo expressivo dos conflitos socioambientais decorrentes da pressão da expansão urbana sobre áreas costeiras ambientalmente sensíveis. Para reduzir os impactos sobre seus ecossistemas, a Prefeitura instituiu, em fevereiro de 2006, duas Unidades de Conservação: o Parque Natural Municipal das Dunas de Sabiaguaba, pelo decreto nº 11.986 e a Área de Proteção Ambiental (APA) da Sabiaguaba, pelo decreto nº 11.987. O Parque, com cerca de 468 ha, abriga dunas, lagoas e tabuleiros pré-litorâneos, sendo voltado à proteção contra a urbanização e a especulação imobiliária. Já a APA, com aproximadamente 1.010 ha, funciona como zona de amortecimento, favorecendo a integração entre uso social e preservação da natureza (Souza, 2011).

Além disso, a conservação da APA da Sabiaguaba é essencial para garantir a continuidade reprodutiva da tartaruga-de-pente (*Eretmochelys imbricata*), uma vez que a região abriga condições naturais que sustentam um número significativo de desovas ao longo dos anos. De acordo com Vilanova (2019), entre 2016 e 2019, foram registrados 51 ninhos na praia, muitos deles concentrados em “bolsões de desova” situados justamente nos trechos mais preservados da APA, onde a presença de dunas fixas, bermas bem formadas e sedimentos de granulometria adequada cria um ambiente ideal para a construção dos ninhos e a eclosão dos filhotes. Esses fatores, associados à menor interferência antrópica dentro da unidade de conservação, favorecem não apenas o sucesso das desovas, mas também o retorno das fêmeas filopátricas às mesmas áreas, reforçando o papel da APA como berçário natural indispensável para a manutenção da espécie no litoral de Fortaleza (Vilanova, 2019).

Na cidade de Fortaleza, a produção do espaço urbano configura-se como um processo abrangente, que incide sobre todo o território municipal, ainda que se manifeste de forma seletiva, concentrando investimentos e infraestruturas em áreas específicas. Historicamente, o setor leste da cidade consolidou-se como uma das principais áreas de atração de equipamentos urbanos e grandes intervenções, concentrando parte significativa dos projetos estruturantes e dos investimentos públicos e privados implementados ao longo da última década (Barbosa, 2016).

Em oposição à Praia da Sabiaguaba, a Praia do Futuro apresenta aproximadamente 8 km de extensão longitudinal e constitui um dos principais sistemas praias urbanos de Fortaleza. Conforme a base cartográfica oficial do município, disponibilizada pela plataforma Fortaleza em Mapas (IPLANFOR, 2023), a área encontra-se subdividida administrativamente nos bairros Praia do Futuro I, com área de 173,32 hectares, e Praia do Futuro II, abrangendo 316,56 hectares. Ambos os setores integram a Secretaria Executiva Regional 7 e pertencem ao Território 22.

Esse compartimento costeiro é marcado por um processo de ocupação urbana historicamente mais antigo e intensivo, associado à valorização do solo urbano e à consolidação

de uma infraestrutura diversificada de serviços, equipamentos e estruturas permanentes ao longo da faixa litorânea. Tais características configuram a Praia do Futuro como um ambiente costeiro fortemente antropizado, cuja dinâmica espacial e funcional resulta da interação entre processos naturais e intervenções antrópicas.

A reorganização dos usos e funções desse espaço costeiro intensificou-se a partir do final da década de 1990, quando iniciativas institucionais passaram a promover sua requalificação com ênfase no fortalecimento das atividades turísticas. Nesse contexto, destaca-se o projeto “Esta Praia Tem Futuro”, lançado em 1999, que buscou aprimorar a infraestrutura local, reordenar os estabelecimentos comerciais e ampliar a atratividade recreacional da área, em consonância com o aumento do fluxo turístico observado em Fortaleza naquele período (Maciel, 2014).

Como resultado dessas transformações, a Praia do Futuro consolidou-se como um dos principais espaços de lazer e recreação da cidade, reunindo ampla diversidade de serviços e atividades associadas ao turismo. A facilidade de acesso, a elevada frequência de visitantes e sua relevância econômica reforçam a importância desse setor no contexto urbano e costeiro de Fortaleza (Fortaleza, 2023).

A ausência de instrumentos de proteção ambiental equivalentes aos existentes na Sabiaguaba resultou em padrões de ocupação mais densos e contínuos, tornando essa área um importante referencial comparativo para a análise dos efeitos da proteção legal sobre a dinâmica de uso e cobertura do solo em ambientes costeiros.

Como resposta à crescente pressão antrópica sobre o litoral brasileiro, foi instituído o Projeto Orla, instrumento de planejamento integrado voltado ao ordenamento do uso e da ocupação da faixa costeira. O Projeto Orla propõe a definição de zonas edificáveis, não edificáveis e de uso controlado, com o objetivo de compatibilizar o desenvolvimento urbano, o turismo e a conservação ambiental, além de minimizar riscos socioambientais associados à ocupação inadequada da orla marítima (Brasil, 2006). No entanto, em diversos municípios brasileiros, sua implementação ocorreu de forma tardia ou parcial, limitando sua capacidade de conter a expansão urbana desordenada e de orientar o uso sustentável do território costeiro.

A avaliação da eficácia dos instrumentos de planejamento costeiro pode ser realizada por meio da análise da evolução da ocupação urbana ao longo do tempo. Nesse sentido, o mapeamento do uso e da cobertura do solo é uma ferramenta essencial, pois representa sinteticamente as classes presentes na superfície terrestre e facilita a compreensão de suas transformações espaciais e temporais (IBGE, 2013). É importante distinguir que a cobertura do solo se refere às características físicas da superfície, como corpos d’água, vegetação e áreas edificadas, enquanto o uso do solo trata das funções que as atividades humanas atribuem a essas superfícies (Duhamel, 2011; Coffey, 2013).

As mudanças nos padrões de uso e cobertura do solo estão diretamente relacionadas aos processos de desenvolvimento socioeconômico e podem resultar em impactos ambientais significativos, positivos ou negativos, dependendo do contexto e da forma como ocorrem (Torres, 2011). Nesse sentido, o avanço das geotecnologias, aliado ao uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e de dados de sensoriamento remoto, tem ampliado as possibilidades de análise espacial, permitindo o monitoramento contínuo das transformações territoriais e a quantificação das mudanças ao longo do tempo (Lu et al., 2004).

O uso de imagens de satélite associado a técnicas de classificação supervisionada tem se consolidado como uma abordagem eficiente para o mapeamento do uso e cobertura do solo em ambientes costeiros, que se caracterizam por elevada heterogeneidade ambiental e dinâmica espacial (Jensen, 2015; Foody, 2002). Dentre os algoritmos disponíveis, o Random Forest destaca-se pela robustez estatística e pela elevada acurácia na discriminação de classes urbanas e naturais, sendo amplamente empregado em estudos ambientais e urbanos (Breiman, 2001;

Belgiu; Dragut, 2016). Complementarmente, o Google Earth Engine (GEE) constitui uma plataforma de computação em nuvem que possibilita o acesso e o processamento de grandes volumes de dados geoespaciais, integrando extensos acervos de imagens de satélite e ferramentas avançadas para análises espaciais e temporais (Gorelick et al., 2017).

Diante desse panorama, este capítulo tem como objetivo analisar a dinâmica da ocupação urbana da Praia da Sabiaguaba como indicador de pressão ambiental, a partir da classificação multitemporal de imagens de satélite do período de 1994 a 2025, utilizando o algoritmo Random Forest na plataforma Google Earth Engine. Adicionalmente, realiza-se uma análise comparativa com a Praia do Futuro, área caracterizada por ocupação urbana consolidada, bem como a construção de um cenário hipotético de ocupação para a Sabiaguaba, elaborado com base nas diretrizes do Projeto Orla.

A partir dessa abordagem integrada, busca-se contribuir para a compreensão dos efeitos da expansão urbana sobre ambientes costeiros sensíveis e fornecer subsídios técnico-científicos para o planejamento e a gestão sustentável da zona costeira.

METODOLOGIA

2. Procedimentos metodológicos

Nesta seção são descritos os procedimentos metodológicos adotados para a obtenção e análise dos resultados referentes à dinâmica multitemporal do uso e ocupação do solo no período de 1994 a 2025. A metodologia contemplou as etapas de aquisição e pré-processamento das imagens, definição das classes temáticas, classificação supervisionada e avaliação da acurácia.

A abordagem fundamenta-se em referenciais do campo do sensoriamento remoto e da modelagem espacial, incluindo o uso da plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017), procedimentos de padronização geométrica e radiométrica (Jensen, 2015; Chander, Markham; Helder, 2009; Lu et al., 2004) e aplicação do algoritmo Random Forest (Breiman, 2001; Belgiu; Dragut, 2016). A definição das classes e a validação da classificação seguem recomendações da literatura especializada em mapeamento de uso e cobertura da terra (Foody, 2002; Lu et al., 2004).

2.1 Área de Estudo

As áreas de estudo localizam-se no município de Fortaleza, estado do Ceará, no setor leste do litoral da cidade. Nesse contexto inserem-se a Praia da Sabiaguaba e a Praia do Futuro, ambas integrantes da zona costeira urbana, porém com padrões distintos de ocupação e enquadramento territorial.

A Praia da Sabiaguaba(SB) situa-se entre a foz do rio Cocó e a Praia do Futuro (Figura 1), em trecho caracterizado por planícies costeiras arenosas, campos de dunas móveis e fixas e sistemas estuarinos associados, compondo um mosaico ambiental de elevada complexidade e sensibilidade (Souza, 2011; Meireles, 2012). A área está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) da Sabiaguaba, unidade de conservação de uso sustentável destinada a compatibilizar a conservação dos ecossistemas costeiros com usos antrópicos controlados. A APA abrange dunas, manguezais, restingas e corpos hídricos, desempenhando funções essenciais na proteção da linha de costa, na recarga aquífera e na manutenção da biodiversidade (CEARÁ, 2006). Ainda assim, a região sofre pressões decorrentes da expansão urbana e da intensificação de atividades turísticas e residenciais (Lopes, 2014).

Os sistemas dunares da Sabiaguaba constituem elemento central da dinâmica sedimentar, atuando como reservatórios naturais de sedimentos e barreiras contra eventos extremos e elevação do nível do mar. Estudos destacam seu papel como fonte sedimentar, área

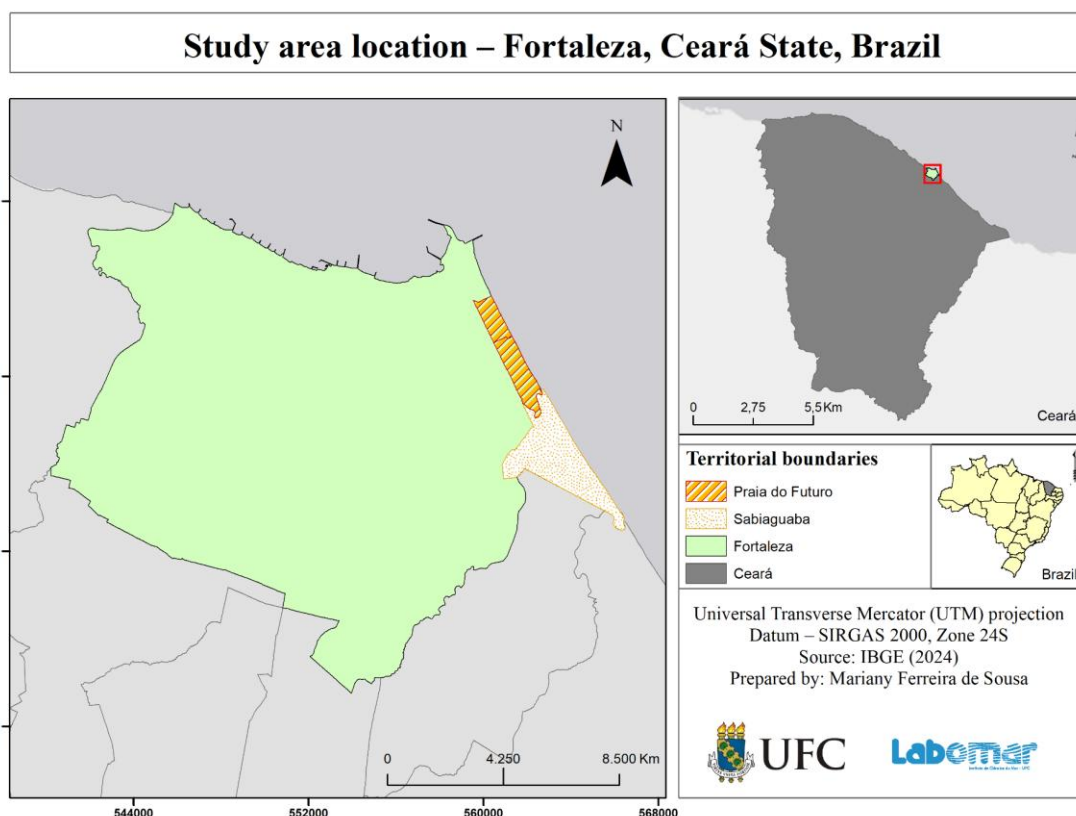
de armazenamento de águas pluviais e componente essencial do litoral de Fortaleza (Souza, 2009; Souza; Silva; Vasconcelos, 2011), além de apontarem a elevada vulnerabilidade da planície litorânea à ação eólica e marinha (Lopes, 2014) e sua relevância para a estabilidade sedimentar e biodiversidade (Barros et al., 2024). Tais sistemas, entretanto, são sensíveis à supressão da vegetação e à compactação do solo (Hesp, 2002; Short; Woodroffe, 2009). Os manguezais associados ao estuário do rio Cocó exercem funções ecológicas importantes, mas encontram-se expostos a impactos urbanos, padrão identificado em diferentes contextos globais (Szafranski; Granek, 2023).

Em contraste, a Praia do Futuro (PF) caracteriza-se como uma das áreas costeiras urbanizadas e consolidadas de Fortaleza, com forte atividade turística, residencial e de lazer, sendo reconhecida tanto pelos serviços especializados de barracas de praia quanto pelo fluxo constante de visitantes e moradores que procuram seus equipamentos de lazer e entretenimento (Freire, 2015). Sua ocupação intensificou-se a partir da segunda metade do século XX, impulsionada pela expansão da malha urbana e valorização imobiliária. A implantação de infraestrutura permanente, vias, redes de saneamento, equipamentos turísticos e edificações de médio e grande porte, resultou em elevada densidade construtiva e significativa artificialização da faixa costeira (Moraes et al., 2020; Souza; Maia, 2022). Esse padrão de uso intensivo do solo interfere na dinâmica sedimentar, reduz a mobilidade natural da linha de costa e amplia a vulnerabilidade a processos erosivos, frequentemente exigindo intervenções artificiais para manutenção da faixa de areia (Lima et al., 2018).

Do ponto de vista normativo, enquanto a Sabiaguaba está submetida às restrições de uma unidade de conservação, a Praia do Futuro é regulada predominantemente por instrumentos de planejamento urbano municipal, como o Plano Diretor e as leis de uso e ocupação do solo, que permitem maiores índices de ocupação e verticalização (Fortaleza, 2023).

Assim, embora ambas as áreas compartilhem características geomorfológicas típicas de planícies costeiras arenosas e estejam sujeitas à influência de processos marinhos, eólicos e fluviais, diferenciam-se quanto ao grau de urbanização e ao regime de gestão territorial. A análise integrada dessas duas realidades, uma inserida em área protegida, porém sob pressão urbana, e outra marcada por urbanização consolidada e uso intensivo do solo, permite compreender de forma mais abrangente os efeitos da ocupação sobre a dinâmica e a sustentabilidade da zona costeira de Fortaleza.

Figura 01 - Localização da área de estudo.



Fonte: autores (2025).

2.2 Base de dados e pré-processamento

A análise multitemporal do uso e cobertura da terra foi realizada a partir de imagens Landsat referentes aos anos de 1994, 1995, 1996, 2000, 2006, 2009, 2015, 2017 e 2025, obtidas por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE), que disponibiliza acervo consistente de dados orbitais para aplicações ambientais (Gorelick et al., 2017).

Foram utilizados produtos de reflectância de superfície com resolução espacial de 30 m (USGS, 2023), considerando a continuidade temporal e a adequação da missão Landsat para estudos de dinâmica costeira. A seleção das imagens priorizou: (i) baixa cobertura de nuvens; (ii) compatibilidade sazonal; e (iii) homogeneidade espacial ao longo da série histórica (Figura 2).

As imagens, previamente ortorretificadas, tiveram o sistema de referência padronizado para UTM, Datum SIRGAS 2000, assegurando consistência espacial para análises métricas (Jensen, 2015). Posteriormente, foram recortadas conforme os limites das áreas de interesse.

Considerando a utilização de diferentes gerações do sensor Landsat, foi realizada a padronização espectral mediante seleção de bandas equivalentes entre sensores, garantindo comparabilidade temporal e reduzindo inconsistências radiométricas (Chander; Markham; Helder, 2009; Lu et al., 2004). Destaca-se que a seleção dos anos foi definida principalmente em função da disponibilidade de imagens.

2.3 Classificação do uso e ocupação do solo e classificação por Random Forest

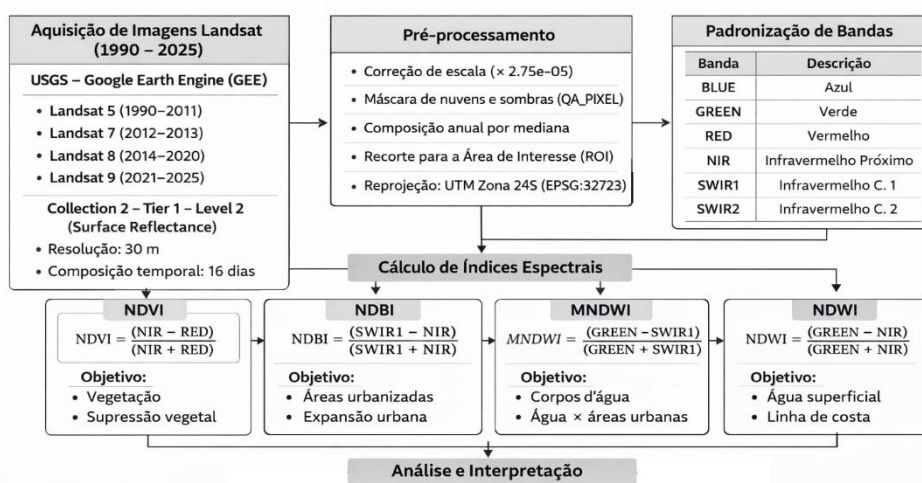
O mapeamento foi conduzido por abordagem supervisionada, visando identificar as principais classes representativas da dinâmica costeira e urbana entre 1994 e 2025. Foram definidas cinco classes temáticas: Dunas/Areia; Manguezal; Solo exposto; Vegetação;

Construção urbana. A classe água foi mapeada, porém excluída das análises temporais subsequentes. A definição das classes considerou sua relevância ambiental e sua capacidade de representar vetores de transformação territorial, especialmente relacionados à expansão urbana e à pressão sobre ambientes costeiros sensíveis (Foody, 2002; Lu et al., 2004).

A classificação do uso e ocupação do solo foi realizada por meio do algoritmo Random Forest, uma técnica de aprendizagem de máquina amplamente utilizada em estudos de sensoriamento remoto devido à sua robustez frente à variabilidade espectral e à sua capacidade de redução de overfitting, que é o sobreajuste do modelo aos dados de treinamento, garantindo que ele aprenda padrões gerais e não detalhes ou ruídos específicos, é essencial para que a classificação seja aplicável a novos dados e a dados heterogêneos (Rodríguez-Galiano et al., 2012; Nguyen et al., 2018). Antes da etapa de modelagem, foi elaborada uma base de amostras por meio da delimitação manual das classes em um arquivo vetorial, garantindo um número significativo de pontos representativos para cada categoria temática. Previamente ao treinamento do modelo, as classes foram delimitadas manualmente por meio da elaboração de um arquivo vetorial contendo um número significativo de amostras representativas de cada classe temática. Essas amostras foram definidas a partir da interpretação visual das imagens, com apoio de dados auxiliares e conhecimento prévio da área de estudo, assegurando adequada representatividade espectral e espacial. O elevado número de amostras assegurou a estabilidade estatística e reduziu a variância dos resultados, conforme prática recomendada em aplicações de classificação temática (Rodríguez-Galiano et al., 2012).

O algoritmo Random Forest baseia-se na construção de múltiplas árvores de decisão a partir de subamostras aleatórias do conjunto de treinamento, geradas com reposição pelo método bootstrap. Em cada divisão de nó, subconjuntos aleatórios de variáveis preditoras são selecionados, reduzindo a correlação entre as árvores e aumentando a robustez do modelo. Durante a classificação, cada árvore atribui a cada pixel uma classe com base nas regras aprendidas, e a classe final é determinada por votação majoritária. Para avaliação do desempenho, utilizou-se um conjunto independente de validação, permitindo a construção da matriz de confusão e o cálculo das métricas de acurácia, precisão, recall, F1-score e índice Kappa. Essa abordagem assegura estabilidade e consistência dos resultados, especialmente em áreas de alta heterogeneidade espectral, como ambientes costeiros (Belgiu; Dragut, 2016).

Figura 2 - Fluxograma do processamento de imagens no Google Earth Engine (GEE).



Fonte: Autores (2025)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise quantitativa da ocupação urbana e da redução da cobertura de dunas nas áreas da Praia do Futuro (PF) e Sabiaguaba (SB) revela dinâmicas espaciais distintas, porém associadas ao avanço da urbanização. Na PF, observa-se um aumento expressivo da mancha urbana ao longo do período analisado, acompanhado pela redução proporcional das áreas dunares, indicando evidenciando uma possível substituição progressiva de superfícies naturais por áreas antropizadas. Na área da SB, embora a expansão urbana tenha ocorrido de forma menos intensa, também se verificam alterações na configuração e continuidade dos campos de dunas.

A redução da cobertura dunar não representa apenas perda real, mas implica modificações estruturais no sistema costeiro, com possíveis impactos sobre funções ecossistêmicas como proteção contra eventos extremos, armazenamento hídrico e estabilidade sedimentar (Silva et al., 2024). A diferença na intensidade das transformações entre PF e SB sugere que o grau de proteção territorial e o padrão de ocupação exercem influência direta sobre a preservação dos sistemas dunares.

Esses resultados indicam que a pressão urbana atua como vetor estruturante da reorganização da paisagem costeira, associando-se a mudanças na distribuição espacial das dunas e podendo contribuir para a vulnerabilidade costeira. Tal comportamento está em consonância com estudos desenvolvidos para o litoral de Fortaleza, que apontam a expansão antrópica como fator determinante na degradação dos campos de dunas (Lopes, 2014; Queiroz; Meireles, 2022). Na PF, a expansão urbana entre 1994 e 2025 refletiu o que foi descrito pela literatura com a ocupação historicamente iniciada na década de 1950, com intensa especulação imobiliária e instalação de edificações de médio e grande porte, condomínios e loteamentos (Queiroz; Meireles, 2022).

Conforme apresentado na Tabela 1, a Praia do Futuro (PF) apresentou aumento expressivo da área urbanizada entre os períodos analisados, passando de 1,27 km² para 2,22 km², enquanto a cobertura de dunas foi reduzida de 1,64 km² para 1,06 km². A variação absoluta indica incremento de 0,95 km² na área urbanizada e perda de 0,58 km² de dunas, evidenciando substituição progressiva de superfícies naturais por áreas antropizadas.

Tabela 1 – Variação espaço-temporal das classes de uso e cobertura da terra

Área	Classe	Área inicial (km²)	Área final (km²)	Variação absoluta (km²)	Variação relativa (%)
PF	Urbanização	1,27	2,22	+0,95	+74,8
PF	Dunas/Areia	1,64	1,06	−0,58	-35,4%
SB	Urbanização	1,28	1,19	−0,09	-7,0%
SB	Dunas/Areia	3,83	2,61	−1,22	-31,9%

A análise estatística da relação entre urbanização e redução das dunas, apresentada na Tabela 2, revelou correlação negativa moderada para PF ($r = -0,67$), com coeficiente de

determinação de 0,45 e significância estatística ($p = 0,049$). Esses resultados indicam que aproximadamente 45% da variabilidade observada na área dunar está estatisticamente associada à variação da área urbanizada no período analisado.

Tabela 2 – Resultados da análise estatística entre urbanização e redução de dunas

Área	Correlação (r)	Coefficiente de determinação (R^2)	p-valor
Praia do Futuro (PF)	-0,67	0,45	0,049
Sabiaguaba (SB)	-0,89	0,79	0,0013

Em contraste, a Sabiaguaba apresentou expansão urbana menos expressiva em termos absolutos, porém acompanhada de redução significativa da cobertura dunar. A correlação negativa forte observada ($r = -0,89$; $R^2 = 0,79$; $p = 0,0013$) indica elevada associação estatística entre as variáveis, sugerindo que, mesmo sob menor intensidade de ocupação, sistemas ambientalmente mais sensíveis podem responder de forma proporcionalmente mais acentuada às pressões antrópicas. Esse padrão é compatível com estudos que apontam que a vulnerabilidade costeira não depende exclusivamente da magnitude da urbanização, mas também da fragilidade geomorfológica, da conectividade morfodinâmica e da configuração espacial pré-existente do sistema (Dissanayake et al., 2015).

O desempenho do classificador Random Forest, apresentado na Tabela 3, demonstrou maior robustez para PF ($Kappa = 0,707$), classificado como concordância elevada (substancial) de acordo com Landis e Koch (1977), enquanto a SB apresentou Kappa de 0,529, caracterizado como concordância moderada pelo mesmo autor. A redução das métricas em SB pode estar associada à maior complexidade espectral e fragmentação da paisagem, embora os resultados permaneçam adequados para análise das tendências espaço-temporais.

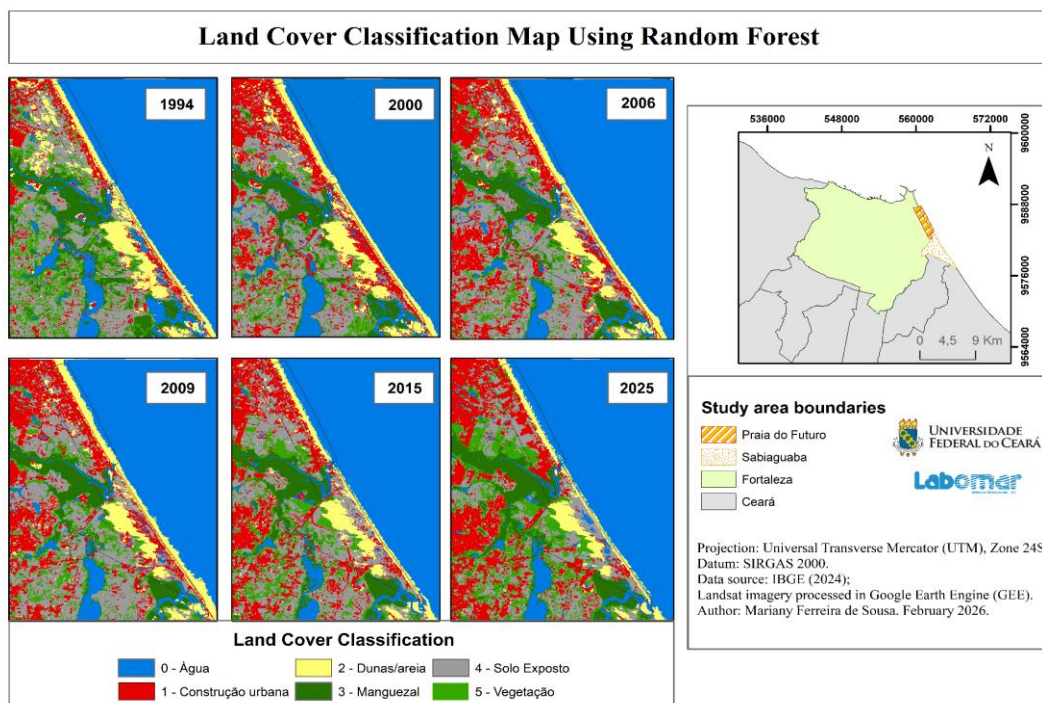
Tabela 3 – Métricas de desempenho do classificador Random Forest

Área	Precision	Recall	F1-score	Accuracy	IoU	Kappa
PF	0,981	0,842	0,906	0,977	0,828	0,707
SB	0,836	0,690	0,756	0,983	0,608	0,529

A análise estatística realizada, incluindo métricas de precisão, acurácia e índice Kappa, indica que o classificador Random Forest produziu resultados consistentes na caracterização do uso e cobertura do solo nas duas áreas estudadas. Apesar da acurácia ligeiramente menor na Sabiaguaba em comparação à Praia do Futuro, o modelo identificou as principais tendências de transformação da paisagem, mostrando capacidade de lidar com dados heterogêneos e complexos. Estudos recentes, como o de Pande et al. (2024), demonstram que o Random Forest mantém desempenho confiável em análises multitemporais de mudanças de cobertura do solo em ambientes com diferentes tipos de ocupação. Diversos estudos recentes envolvendo Random Forest relatam métricas estáveis de acurácia e coeficiente Kappa elevadas em classificações de sensoriamento remoto aplicadas ao monitoramento ambiental, mudanças do uso da terra e

deteção de padrões ambientais, indicando a consistência do método para análises de planejamento territorial (Wang et al., 2024).

Figura 5 - Mapa de Classificação da Cobertura do solo utilizando Random Forest



Fonte: autores (2025).

3.1 Situação atual da Sabiaguaba em relação às zonas edificáveis do Projeto Orla

O Plano de Gestão Integrada da Orla Marítima de Fortaleza (Projeto Orla), elaborado em 2006, já indicava cenários contrastantes entre os trechos da Praia do Futuro (PF) e da Sabiaguaba (SB). Para a Praia do Futuro, o documento registrava intensa ocupação da faixa de praia e pós-praia, com instalação de barracas de grande porte, privatização de áreas públicas, restrição de acesso e intervenções em áreas de preservação permanente, incluindo dunas fixas e móveis próximas ao rio Cocó (Fortaleza, 2006). Também eram apontados o início do processo de verticalização, a expansão da rede hoteleira, a especulação imobiliária e a degradação ambiental associada à supressão de dunas, à impermeabilização do solo e à deficiência de infraestrutura urbana.

A atualização do Projeto Orla, em 2018, confirmou a consolidação dessas tendências, destacando o adensamento populacional, a intensificação da verticalização, a expansão de estruturas sobre terrenos públicos e o agravamento dos impactos sobre a dinâmica sedimentar, com redução da faixa de praia e risco de soterramento de edificações (Fortaleza, 2018). Os resultados obtidos no presente estudo corroboram esse cenário ao evidenciar aumento significativo da urbanização na PF entre 1994 e 2025 (+0,95 km²) e redução da cobertura dunar (-0,58 km²), além de correlação negativa moderada entre urbanização e perda de dunas ($r = -0,67$; $R^2 = 0,45$). Esses dados indicam que a expansão urbana permanece como principal vetor de reorganização da paisagem costeira e de intensificação da vulnerabilidade ambiental na região.

No caso da Sabiaguaba, o Projeto Orla (Fortaleza, 2006) caracterizava a área como um dos trechos ambientalmente mais sensíveis da orla de Fortaleza, composta por dunas fixas, móveis e semifixas, lagoas interdunares, terraços marinhos, beachrocks, manguezais e sítios

arqueológicos. Apesar do elevado valor ecológico, já eram registradas pressões antrópicas como ocupações irregulares, tráfego de veículos sobre dunas, retirada clandestina de areia e ausência de proteção aos vestígios arqueológicos. O documento alertava, ainda, que a implantação de novas infraestruturas poderia induzir a especulação imobiliária e ampliar a ocupação de áreas de preservação permanente.

Em 2018, o cenário descrito pelo Projeto Orla indicava persistência e intensificação dessas pressões, embora o trecho ainda apresentasse significativo grau de conservação. O cenário tendencial projetado previa aumento do tráfego de veículos, fragmentação de lagoas e vegetação fixadora de dunas, adensamento populacional em APP, impermeabilização do solo e possível comprometimento de comunidades tradicionais. Em contraste, o cenário desejado estabelecia como diretrizes a implementação efetiva do Plano de Manejo, o disciplinamento da orla, a retirada de estruturas irregulares, o incentivo ao ecoturismo e a garantia da integridade dos ecossistemas costeiros.

A análise quantitativa realizada neste estudo demonstra que, apesar da existência formal de instrumentos de gestão e de unidades de conservação, a Sabiaguaba apresenta transformações significativas em sua cobertura natural. Entre os períodos analisados, a área de dunas reduziu de 3,83 km² para 2,61 km² (-1,22 km²). A correlação negativa forte entre urbanização e redução das dunas ($r = -0,89$; $R^2 = 0,79$) indica elevada dependência estatística entre as variáveis, sugerindo que a dinâmica de ocupação do entorno exerce influência direta sobre a configuração do sistema dunar. Embora a expansão urbana absoluta tenha sido menos intensa que na PF, a maior sensibilidade geomorfológica e ecológica da Sabiaguaba faz com que intervenções pontuais resultem em impactos proporcionalmente mais expressivos, como fragmentação de dunas, descontinuidade dos corredores eólicos e aumento da suscetibilidade à erosão.

Adicionalmente, o desempenho do classificador (Kappa = 0,529) reflete a elevada heterogeneidade ambiental da área, característica de sistemas costeiros complexos e relativamente preservados.

Os resultados obtidos indicam uma tendência de redução da cobertura natural, evidenciando um descompasso entre os objetivos de conservação estabelecidos pelo Projeto Orla e a dinâmica real de uso e ocupação do território. Apesar da instituição do Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental (APA) da Sabiaguaba e do Parque Natural Municipal das Dunas de Sabiaguaba (Fortaleza, 2010), observa-se que o cenário projetado para 2006 não se concretizou plenamente. A expansão urbana e as pressões antrópicas sobre dunas, vegetação nativa e solos expostos mostram que as diretrizes do plano não foram suficientes para impedir alterações significativas na paisagem, ressaltando a necessidade de monitoramento contínuo, fiscalização e estratégias adicionais de conservação para garantir a efetividade da unidade de proteção ambiental.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do classificador Random Forest apresentou desempenho satisfatório na análise espaço-temporal do uso e cobertura da terra, com resultados positivos quanto à precisão, acurácia e índice Kappa. Os indicadores obtidos confirmam a adequação do método para estudos de ocupação urbana e mudanças ambientais em áreas costeiras, mesmo em contextos caracterizados por heterogeneidade ambiental. No presente estudo, embora a acurácia alcançada para a Sabiaguaba tenha sido inferior à verificada na Praia do Futuro, o algoritmo identificou as principais tendências de transformação da paisagem, evidenciadas pela expansão urbana de 1,27 km² para 2,22 km² na PF e de 1,28 km² para 1,19 km² na SB, concomitante à redução da cobertura de dunas de 1,64 km² para 1,06 km² na PF e de 3,83 km² para 2,61 km²

na SB. Os resultados mostram que aproximadamente 45% da variação na área de dunas na PF e 79% na SB podem ser explicadas pela dinâmica urbana, indicando forte pressão antrópica sobre ambientes sensíveis. Tais achados convergem com a literatura, que reconhece o Random Forest como um método apropriado para o tratamento de dados complexos e heterogêneos, apresentando desempenho superior a classificadores tradicionais em diferentes aplicações de sensoriamento remoto (Rodríguez-Galiano et al., 2012).

A operacionalização do classificador permitiu o processamento de imagens Landsat de diferentes anos, sem necessidade de aquisição de novos dados, demonstrando um método relativamente rápido e replicável para outras regiões costeiras. Para trabalhos futuros, recomenda-se o uso de pontos de controle validados em campo, combinação de diferentes bandas espectrais ou imagens de maior resolução, como Sentinel, e testes de outros algoritmos de classificação disponíveis em plataformas de machine learning. Tais aprimoramentos podem aumentar a confiabilidade dos resultados e permitir análise mais detalhada da dinâmica ambiental em áreas sensíveis.

Por fim, os achados deste estudo destacam a importância do planejamento territorial e do manejo de pressões antrópicas, sendo essencial que políticas públicas, unidades de conservação e práticas de conservação costeira sejam constantemente avaliadas e ajustadas à realidade dinâmica das regiões de estudo, considerando a redução observada nas dunas, a fragmentação da vegetação e os impactos da expansão urbana, especialmente em áreas de proteção ambiental como a APA da Sabaguaba.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. G.; CALLIARI, L. J.; CORRÊA, I. C. S.; PINHEIRO, L. S. Morfodinâmica da Praia do Futuro, Fortaleza-CE: uma síntese de dois anos de estudo. *Quaternary and Environmental Geosciences*, São Paulo, v. 1, n. 2, p. 49–57, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/abequa.v1i2.14092>.
- BARROS, Ana Carla Oliveira de; ARAÚJO, Francisca Laryssa Feitosa; RABELO, Francisco Davy Braz; SILVA, Edson Vicente da. Análise crítica do plano de manejo Parque Natural Municipal das Dunas e Área de Proteção Ambiental de Sabaguaba, Fortaleza, Ceará: à luz da Geoecologia das Paisagens. *Revista Pantaneira*, Aquidauana-MS, v. 24, ed. esp. CIGEPAM (UFC), p. 181-198, 2024.
- BELGIU, M.; DRĂGUT, L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 114, p. 24-31, 2016.
- BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza. *Diário Oficial da União*: seção 1, Brasília, DF, 19 jul. 2000.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Projeto Orla: subsídios para a gestão integrada da orla marítima. Brasília: MMA, 2006.
- BREIMAN, L. Random forests. *Machine Learning*, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001.
- BARBOSA, Anna Emília Maciel. Reestruturação socioespacial em Fortaleza e suas implicações na habitação. 2016. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

BROMMER, M. B.; BOCHEV-VAN DER BURGH, L. M. Sustainable coastal zone management: a concept for forecasting long-term and large-scale coastal evolution. *Journal of Coastal Research*, v. 25, n. 1, p. 181–188, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.2112/07-0909.1>.

CEARÁ. Governo do Estado do Ceará. Área de Proteção Ambiental da Sabiaguaba: plano de manejo. Fortaleza, 2006.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, v. 113, n. 5, p. 893–903, 2009.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, v. 37, n. 1, p. 35–46, 1991.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices. Boca Raton: CRC Press, 2009.

CARVALHO, W. S.; MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; SANTOS, T. L. Uso e cobertura do solo utilizando a plataforma Google Earth Engine (GEE): estudo de caso em uma unidade de conservação. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 7, n. 2, p. 19515–19530, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-243>.

COFFEY, R. The difference between “land use” and “land cover”. Michigan State University, 2013. Disponível em: https://www.canr.msu.edu/news/the_difference_between_land_use_and_land_cover. Acesso em: 20 fev. 2026.

DIEGUES, A. C. O mito moderno da natureza intocada. 6. ed. São Paulo: Hucitec, 2008.

DUHAMEL, C. Land use and land cover, including their classification. In: *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*. Paris: UNESCO, 2011. v. 1, p. 1–9. Disponível em: <http://www.eolss.net/sample-chapters/c19/E1-05-01-01.pdf>.

DRUMMOND, J. A.; FRANCO, J. L. A.; OLIVEIRA, D. Uma análise sobre a história e a situação das unidades de conservação no Brasil. In: GANEM, R. S. (org.). *Conservação da biodiversidade: legislação e políticas públicas*. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2010. p. 341–385.

DAMASCENO, M. L. M.; TEIXEIRA, M. F. Construção de consenso na proteção do patrimônio socioambiental: uma análise sobre a requalificação da Praia do Futuro – Ceará. *JURIS – Revista da Faculdade de Direito*, v. 34, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/juris.v34i2.17859>.

FORTALEZA (CE). Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente – SEUMA. Projeto Orla de Fortaleza: diagnóstico e diretrizes de gestão integrada da orla marítima. Fortaleza: SEUMA, 2006.

FORTALEZA (CE). Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente – SEUMA. Projeto Orla de Fortaleza: atualização do diagnóstico e cenários da orla marítima. Fortaleza: SEUMA, 2018.

FORTALEZA. Prefeitura Municipal de Fortaleza. Secretaria do Turismo. Levantamento do Observatório do Turismo de Fortaleza indicando fluxo turístico na Praia do Futuro. Fortaleza, 2023. Dados do Observatório do Turismo de Fortaleza (Sistema Fecomércio, 2022).

FORTALEZA. Prefeitura Municipal. Plano Diretor Participativo de Fortaleza. Fortaleza, 2023.

FORTALEZA (CE). Prefeitura Municipal de Fortaleza. Prefeitura de Fortaleza decreta Praia do Futuro como área de turismo sustentável. Fortaleza, 2023. Disponível em: <https://www.fortaleza.ce.gov.br/noticias/prefeitura-de-fortaleza-decreta-praia-do-futuro-como-area-de-turismo-sustentavel>. Acesso em: 11 jun. 2024.

FOODY, G. M. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, v. 80, n. 1, p. 185-201, 2002.

FREIRE, D. F.; TEIXEIRA, L. N. M. C. Barracas da Praia do Futuro: serviços turísticos no litoral de Fortaleza-CE. *Revista Formação*, v. 2, n. 22, p. 79-98, 2015. DOI: <https://doi.org/10.33081/formacao.v2i22.3439>.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18-27, 2017.

GÜLCI, S.; WING, M.; AKAY, A. E. Land use and land cover (LULC) mapping accuracy using single-date Sentinel-2 MSI imagery with random forest and classification and regression tree classifiers. *Geomatics*, v. 5, n. 3, art. 29, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/geomatics5030029>.

GOMES, R. S.; ARAÚJO, M. C.; MEIRELES, A. J. A. Urbanização costeira e vulnerabilidade a eventos extremos no litoral de Fortaleza (CE). *Journal of Coastal Research*, v. 39, n. 2, p. 356–368, 2023.

GOMES, R. S.; ARAÚJO, M. C.; MEIRELES, A. J. A. Coastal urbanization, erosion risk and planning challenges in northeastern Brazil. *Journal of Coastal Research*, v. 39, n. 2, p. 356–368, 2023.

GÓMEZ, I. et al. A review of disturbances to the ecosystems of the Mexican Caribbean, their causes and consequences. *Journal of Marine Science and Engineering*, v. 10, n. 644, p. 1–23, 2022.

GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdam, v. 202, p. 18–27, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

HESP, P. A. Coastal dunes in Australia: morphology, formation and management. Sydney: University of New South Wales Press, 2002.

HESP, P. A. Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, v. 48, p. 245–268, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas – SIRGAS 2000. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual técnico de uso da terra. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. (Série Manuais Técnicos em Geociências, n. 7).

JENSEN, J. R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. 4. ed. New York: Pearson, 2015.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, v. 25, n. 12, p. 2365-2401, 2004.

LIMA, A. F.; MAIA, L. P.; MORAIS, J. O. Intervenções antrópicas e resposta morfodinâmica na Praia do Futuro, Ceará. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 18, n. 4, p. 543–556, 2018.

LOPES, L. S. Análise da vulnerabilidade ambiental da Área de Proteção Ambiental da Sabiaguaba, Fortaleza. 2014. Monografia (Graduação em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Fortaleza, 2014.

MEIRELES, A. J. A. Geomorfologia costeira: funções ambientais e sociais. Fortaleza: Edições UFC, 2012. Disponível em: <https://www.ppggeografia.ufc.br/images/documentos/GEOMORFOLOGIA-COSTEIRA1.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

MORAES, A. C. R. Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil. São Paulo: Annablume, 2007.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Gestão integrada da zona costeira no Brasil: diretrizes atualizadas. Brasília, 2021.

MORAIS, J. O.; MAIA, L. P.; MEIRELES, A. J. A. Dinâmica costeira e urbanização no litoral de Fortaleza. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 5, p. 2456–2470, 2020.

MORAES, A. C. R. Gestão costeira integrada e ordenamento territorial no Brasil: avanços e limites. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v. 17, n. 3, p. 327–340, 2017.

MACIEL, W. R. N. Tempos e espaços da Praia do Futuro: usos e classificações de uma zona liminar. 2011. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MACIEL, W. R. N. As barracas de praia e a “civilização” do lazer: espaço urbano, poder e sociabilidade na Praia do Futuro. *Revista de Ciências Sociais*, v. 45, n. 1, p. 187–219, 2014.

MACIEL, A. E. A (re)produção do espaço no Grande Mucuripe, em Fortaleza, Ceará, Brasil. Geosaberes: Revista de Estudos Geoeducacionais, v. 6, n. 3, p. 469–478, 2015.

NICOLODI, J. L.; PETERMANN, R. M. Vulnerabilidade costeira e planejamento territorial no litoral brasileiro. Revista de Gestão Costeira Integrada, v. 11, n. 1, p. 37-50, 2011.

PANDE, C. B. et al. Characterizing land use/land cover change dynamics by an enhanced random forest machine learning model: a Google Earth Engine implementation. Environmental Sciences Europe, v. 36, p. 1-23, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00901-0>.

PEREIRA, L. C.; MEIRELES, A. J. A. Evolução da ocupação urbana e impactos ambientais na orla leste de Fortaleza. Revista da ANPEGE, v. 15, n. 28, p. 89-108, 2019.

POLETTE, M.; SILVA, L. P. Gestão costeira integrada no Brasil: avanços e desafios. Desenvolvimento e Meio Ambiente, v. 44, p. 29-45, 2018.

POLETTE, M.; SILVA, L. P. Integrated coastal management in Brazil: instruments, limits and perspectives. Ocean & Coastal Management, v. 158, p. 15–25, 2018.

PREFEITURA MUNICIPAL DE FORTALEZA. Plano de Manejo do Parque Natural Municipal das Dunas de Sabiaguaba e da Área de Proteção Ambiental de Sabiaguaba. Fortaleza: Prefeitura de Fortaleza, 2010. Disponível em: https://urbanismoemeioambiente.fortaleza.ce.gov.br/images/urbanismo-e-meio-ambiente/planejamento/plano_de_manejo_da_sabiaguaba.pdf. Acesso em: 20 fev. 2026.

PANDE, C. B. et al. Characterizing land use/land cover change dynamics by an enhanced random forest machine learning model: a Google Earth Engine implementation. Environmental Sciences Europe, v. 36, p. 1–23, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00901-0>.

PONTIUS JR., R. G.; MILLONES, M. Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement. International Journal of Remote Sensing, v. 32, n. 15, p. 4407–4429, 2011.

RODRIGUEZ-GALIANO, V. F. et al. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 67, p. 93–104, 2012.

KHAN, S.; BHARDWAJ, A.; SAKTHIVEL, M. Accuracy assessment of land use land cover classification using machine learning classifiers in Google Earth Engine: a case study of Jammu District. ISPRS Archives, v. XLVIII-4, p. 263–268, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-2024-263-2024>.

SHORT, A. D.; WOODROFFE, C. D. The coast of Australia. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

SOUZA, L. S. F.; SILVA, E. V.; VASCONCELOS, F. P. As UCs de Sabiaguaba (Fortaleza – Ceará, Brasil): diagnóstico geoambiental e propostas de gestão e manejo. *Revista Geográfica de América Central*, v. 2, n. 47E, p. 1-17, 2011.

SOUZA, R. F.; MAIA, L. P. Urbanização costeira e conflitos socioambientais no litoral nordestino. *Ocean & Coastal Management*, v. 225, art. 106245, 2022.

SOUZA, R. F.; MAIA, L. P. Urbanização costeira, planejamento e adaptação a riscos no litoral brasileiro. *Ocean & Coastal Management*, v. 225, art. 106245, 2022.

SILVA, D. R.; SOUZA, R. F.; MAIA, L. P. Planejamento urbano e uso do solo na orla marítima de Fortaleza (CE). *Cidades*, v. 18, n. 32, p. 77–95, 2021.

SOUZA, L. S. F.; SILVA, E. V.; VASCONCELOS, F. P. A gestão integrada da zona costeira através de áreas protegidas: o caso Sabiaguaba (Fortaleza – CE, Nordeste do Brasil). Fortaleza: [instituição responsável], [ano]. Disponível em: <https://acervo.fortaleza.ce.gov.br/download-file/documentById?id=29db7708-c69f-418b-b504-ea878e134839>. Acesso em: 20 fev. 2026.

SOUZA, L. S. F. Análise geoambiental das unidades de conservação de Sabiaguaba (Fortaleza – CE). 2009. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

SZAFRANSKI, G. T.; GRANEK, E. F. Contamination in mangrove ecosystems: a synthesis of literature reviews across multiple contaminant categories. *Marine Pollution Bulletin*, v. 196, art. 115595, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115595>.

TORRES DE QUEIROZ, M.; MEIRELES, A. J. A. Urban occupation in the dune fields and the consequences for the city of Fortaleza, Ceará, northeastern Brazil / Ocupação urbana nos campos de dunas e as consequências para a cidade de Fortaleza, Ceará, Nordeste do Brasil. William Morris Davis – *Revista de Geomorfologia*, v. 3, n. 2, p. 1–18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.48025/ISSN2675-6900.v3n2.2022.161>. Acesso em: 20 fev. 2026.

TORRES, D. R. Análise multitemporal do uso da terra e cobertura florestal com dados dos satélites Landsat e ALOS. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat missions. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2023. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>. Acesso em: 10 jan. 2026.

VILANOVA, M. Q. Mapeamento de ninhos e determinação da área preferencial de desova da tartaruga *Eretmochelys imbricata* na Praia da Sabiaguaba, Fortaleza–CE. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Oceanografia) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar (LABOMAR), Fortaleza, 2019.

WANG, Y.; JIN, S.; DARDANELLI, G. Vegetation classification and evaluation of Yancheng coastal wetlands based on random forest algorithm from Sentinel-2 images. *Remote Sensing*, v. 16, n. 7, 2024. DOI:10.3390/rs16071124.