MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E LETRAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA
MESTRADO ACADÊMICO EM GEOGRAFIA

JOÃO VICTOR ALVES AMORIM

PEDOMETRIA APLICADA AO MAPEAMENTO DE SOLOS NO DELTA DO PARNAÍBA, PIAUÍ

TERESINA – PI
2019

JOÃO VICTOR ALVES AMORIM

PEDOMETRIA APLICADA AO MAPEAMENTO DE SOLOS NO DELTA DO PARNAÍBA, PIAUÍ

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Piauí como requisito à obtenção do grau de Mestre em Geografia.
Área de concentração: Organização do Espaço e Educação Geográfica.
Linha de pesquisa: Estudos Regionais e Geoambientais.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares

TERESINA – PI

2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Comunitária Jornalista Carlos Castello Branco
Serviço de Processamento Técnico

A524p Amorim, João Victor Alves.
Pedometria aplicada ao mapeamento de solos no Delta do Parnaíba, Piauí / João Victor Alves Amorim.-- 2019.
130 f.: il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Teresina, 2019.
"Orientador: Gustavo Souza Valladares'.

1. Solos. 2. Solos - Mapeamento Digital (MDS). 3. Modelos preditivos. 4. Planície litorânea. I. Título.

CDD: 631.4

JOÃO VICTOR ALVES AMORIM

"PEDOMETRIA APLICADA AO MAPEAMENTO DE SOLOS NO DELTA DO PARNAÍBA, PIAUÍ"

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Piauí – UFPI.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Souza Valladares

Aprovado em 15 / 04 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. _____

[Orientador - Presidente]

GUSTAVO SOUZA VALLADARES

Prof. Dr. _____

[Examinador Interno ao Programa – PPGGEO – UFPI]

CARLOS SAIT PEREIRA DE ANDRADE

Profa. Dra. _____

[Examinadora Externa ao Programa – UFPI]

GIOVANA MIRA DE ESPINDOLA

Prof. Dr. _____

[Examinador Externo à Instituição – UFPR]

CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA

"O amor pelo estudo do Solo deveria servir para uma condição de grande sucesso das pesquisas futuras, não só para as pessoas, mas também para a natureza, e a confiança sólida em sucesso."

Vassilii Vasil'evich Dokuchaev

AGRADECIMENTOS

Nessa reta final, é tempo de olhar pra trás e ver que essa jornada de dois anos não foi percorrida desacompanhada. E a vocês presto uma singela homenagem, por me mostrarem que nunca estive desabrigado durante essa trajetória.

É incrível o fato de como os seres humanos entram e saem de nossas vidas. Por mais que em um período considerado curto, no entanto suficiente para deixar marcas que nos acompanham pelo resto de nossa existência. Marcas que, independente de boas ou ruins, nos ajudam a crescer como indivíduo e profissional.

Os momentos de alegria acalentam nossa alma e nos servem de energia para enfrentar as surpresas cotidianas, e os momentos de dificuldade vem para mostrar nossa capacidade de superá-los e que, por mais que pareça, nunca estamos verdadeiramente sós. Esse é o sentimento que tenho quando penso acerca de tudo o que foi vivido até o dia de hoje. E por esse motivo, só tenho a agradecer.

Agradeço a Deus, pela fé, por todas as graças alcançadas durante esse tempo e por sempre iluminar meus passos, principalmente aqueles mais decisivos. Pela força e disposição, e pela capacidade de levantar e seguir em frente diante de cada obstáculo.

À minha família, especialmente meus pais, Elena e Antônio, e meu irmão Pedro Henrique, minha base, que sempre me mostraram o verdadeiro significado de amor e suporte, pelo apoio imensurável que sempre me deram e continuam a me dar a cada dia e pela educação que, com muito sacrifício, me foi proporcionada. Apesar das inúmeras dificuldades, sempre me estimularam a continuar, me ensinarem a viver com dignidade e a nunca desistir dos meus sonhos e objetivos.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Gustavo Souza Valladares, que durante todo o percurso acabou sendo além de um mestre, também um amigo. Obrigado pela confiança, orientações, chamadas de atenção e pelas maravilhosas oportunidades que me concedeu durante o tempo que passei sob sua orientação. Graças a você eu pude crescer profissionalmente e sei que estou cada dia mais perto de me tornar o profissional que almejo ser. Você é espelho e um ótimo ser humano.

Aos meus queridos amigos que, dentro ou fora da Geografia, foram capazes de alegrar meus dias e me motivar para chegar a esse resultado. Palavras não são suficientes para expressar meus agradecimentos ao universo por ter cruzado nossos caminhos e o crescimento pessoal que tive através das experiências compartilhadas por cada um: Andréa Maciel e Carol Mateus, que apesar de longe, sempre se fazem presentes na minha vida; Lucas Almeida;

Mirya Grazielle; Janaine Leal; Samantha Ramos; Andressa Leal; Jéssica Frota; Diana Melo; Samuel Lima; José Rosa Neto; Wandemara Oliveira; Emerson Alves e Juliane Braga. A vocês meu muito obrigado. Saibam que estou sempre a torcer pelo sucesso e felicidade de cada um.

Aos amigos de jornada, meus "Mestrandos Anônimos", Janaira Leal, Amanda Dias, Wellynne Carla, Poliana Ferraz, Larissa Mendes e Francisco John Lennon (*Let It Be*), pelo forte companheirismo firmado nesses dois anos e por tornar os momentos dentro e fora de sala de aula muito mais agradáveis.

Aos companheiros do Laboratório de Geomática e Membros do Grupo de Pesquisa "Estudos em Geografia Física (UFPI)", em especial Professora Doutora Cláudia Maria Sabóia Aquino, Léya Cabral, Engª Agrª Doutora Mara Lúcia Oliveira, Miguel Sobrinho, Francílio de Amorim, pela ajuda, ensinamentos e momentos de descontração durante a pesquisa.

Institucionalmente, agradeço à Universidade Federal do Piauí e ao Programa de Pós-graduação em Geografia, pela possibilidade de cursar o mestrado e pelo conhecimento adquirido. Ao Centro de Ciências Humanas e Letras pelo espaço dos Laboratórios de Geomática e de Solos e Sedimentos, local onde maior parte da pesquisa foi efetivada e onde trabalho desde o período como bolsista PIBIC na graduação. Ao Centro de Ciências Agrárias, em especial ao Colégio Agrícola de Teresina, pelo espaço do Laboratório de Solos cedido para análises de sódio e potássio do solo.

Aos Professores Doutores Marcos Gervásio Pereira e Ademir Fontana e à equipe do Laboratório de Gênese e Classificação do Solo da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Campus Seropédica, pela ajuda com as análises dos solos.

Ao Professor Doutor Luis Fernando Chimelo Ruiz, pela disponibilização do software "ADtoSIG" para conversão dos resultados dos algoritmos classificadores em mapas temáticos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do projeto "Paisagem Costeira do Piauí", e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de minha bolsa de mestrado, que proporcionou os meios necessários para conclusão deste trabalho.

A todos os amigos de longa data, demais familiares, colegas e conhecidos, que de alguma forma contribuíram para esse resultado, meu muito obrigado! Essa é uma vitória coletiva.

RESUMO

AMORIM, João Victor Alves. **Pedometria aplicada ao mapeamento de solos no Delta do Parnaíba, Piauí**. Teresina. 2019. 130f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Piauí, Teresina.

As planícies localizadas nas regiões litorâneas são importantes criadouros de espécies vegetais e animais, mas também são ambientes de transição entre o marinho e o continental, e por tal aspecto apresentam grande fragilidade. O litoral do Piauí apresenta grande diversidade de ecossistemas frágeis e materiais pouco consolidados, onde diversos processos erosivos e de deposição atuam sobre ele, caracterizando um ambiente altamente dinâmico. No Delta do Rio Parnaíba, as planícies vegetadas são importante fonte de renda para comunidades de pescadores, catadores de caranguejo e profissionais que trabalham com o turismo, tendo em vista seu grande valor paisagístico e turístico. Os fatores apontados acima justificam o mapeamento dos solos, visando sua conservação e monitoramento. A execução de mapeamentos de solo é uma demanda permanente, no entanto, seu método de elaboração tradicional não permite rápidas execuções e baixo custo. O mapeamento digital pretende otimizar o processo ao trabalhar com modelos que tratam a variabilidade espacial dos solos quantitativamente. Nessa perspectiva, o objetivo geral da pesquisa é avaliar a resposta de produtos geomorfométricos e espectrais, por meio de diferentes técnicas de integração, para o mapeamento das classes de solo na área do Delta do Parnaíba. Como objetivos específicos buscou-se: i) Gerar atributos e/ou variáveis preditivas para o Mapeamento Digital de Solos (MDS) da área; ii) Verificar quais atributos utilizados possui maior confiabilidade para discriminar e predizer as classes de solo da área de estudo; iii) Elaborar mapas digitais de solos para a área do Delta do Parnaíba – PI a partir da Pedometria; iv) Comparar os mapas obtidos por Mapeamento Digital de Solos com o produzido pelo método tradicional; v) Avaliar a acurácia dos mapas gerados por Pedometria a partir de metodologias selecionadas. Metodologicamente, o trabalho foi dividido em quatro grupos de atividades: 1) trabalho de campo na área de estudo para coleta das amostras de solos, 2) análise, em laboratório, dos atributos físicos e químicos dos perfis de solo coletados, para fins de caracterização e classificação, 3) geração de variáveis preditivas para o MDS da área, e 4) MDS do Delta do Parnaíba a partir dos modelos selecionados e avaliação da qualidade dos mapas. Foram elaboradas matrizes de dados considerando diferentes combinações de variáveis e níveis taxonômicos. Verificou-se o desempenho do algoritmo de aprendizado de máquina J48 (árvores de decisão) para um conjunto composto por 12 matrizes de dados, com a finalidade de identificar aquelas que apresentaram o melhor nível de acurácia. A partir da definição do modelo foram gerados os mapas pedológicos digitais e validado por meio de matriz de erros cujos pontos de referência foram classificados em campo, além de validação através do mapa pedológico convencional pré-existente. As matrizes em que foram utilizadas todas as variáveis preditivas obtiveram maior acurácia tanto para o modelo, quanto para o mapa, sustentando o uso conjunto completo de atributos do relevo e índices derivados de sensor remoto orbital. Dentre os resultados ressalta-se que de acordo com os coeficientes de validação aplicados (Exatidão Global - EG, índice Kappa - K, exatidão do usuário e produtor) o mapa gerado com legenda baseada em associações da paisagem, expresso pela matriz 12, foi o que apresentou os melhores resultados, alcançando 72,64% de EG e K=0,61, sendo considerado bom dentro dos critérios de avaliação adotados. Portanto, obtiveram-se resultados satisfatórios, enfatizando que, para a área, as variáveis derivadas de bandas espectrais de sensores orbitais são essenciais para o entendimento da distribuição dos solos na paisagem além de mostrarem-se mais efetivas para a classificação.

Palavras-chave: Mapeamento Digital de Solos. Modelos preditivos. Árvores de decisão. Planície litorânea.

ABSTRACT

AMORIM, João Victor Alves. **Pedometrics applied to the soil mapping on Delta Parnaíba, Piauí**. Teresina. 2019. 130p. Thesis (Master's Degree in Geography) – Geography Postgraduate Program, Federal University of Piauí, Teresina.

The coastal plains are important breeding places for plant and animal species, but also are transitional environments between the marine and the continental, and because of this present great fragility. The Piaui coast presents a great diversity of fragile ecosystems and little consolidated materials, where several erosive and depositional processes act on it, characterizing a highly dynamic environment. In the Parnaíba River Delta, the vegetated plains are an important source of income for communities of fishermen, crab pickers and tourism professionals, given their great scenic and tourist value. This factors justify the mapping of soils, aiming at their conservation and monitoring. The execution of soil mapping is a permanent demand, however, its traditional elaboration method does not allow a fast execution neither low cost. Digital mapping intends to optimize the process using models that quantitativelly treat the spatial variability of the soils. In this perspective, the general objective of the research is to evaluate the response of geomorphometric and spectral products, using different integration techniques, to map soil classes in the Parnaíba Delta area. The specific objectives are: i) Generate parameters and/or predictive variables for the Digital Soil Mapping of the area; ii) Verify which attributes are most reliable to discriminate and predict the soil classes of the study area; iii) elaborate digital maps of soils for the area of the Delta of the Parnaíba - PI through the pedometric methods selected; iv) Confront the maps obtained by Digital Soil Mapping with that produced by the conventional method; v) To evaluate the accuracy of the maps generated by Pedometrics from selected methodologies. Methodologically, the work was divided in four groups of activities: 1) field work in the study area for collecting the soil samples, 2) laboratory analysis of the physical and chemical attributes of the collected soil profiles, for characterization and classification 3) generation of predictive variables for the DSM of the area, and 4) DSM of the Parnaíba Delta through the selected models and evaluation of the maps quality. Data matrices were elaborated considering different combinations of variables and taxonomic levels. The performance of machine learning algorithm J48 (Decision trees) for a set composed by 12 data matrices was verified, in order to identify those that presented the best level of accuracy. Through the definition of the model the digital pedological maps were generated and validated through an error matrix whose reference points were classified in the field, in addition to validation through the pre-existing conventional pedological map. The matrices in which all the predictive variables were used obtained greater accuracy for the predictive model and the map, endorsing the full set use of relief attributes and orbital sensor derived indices. Among the results, according to the validation coefficients applied (Global Accuracy - GA, Kappa statistics - K , Error Matrix and accuracy from the producer's and the user's standpoints.), the map generated with legend based on landscape associations, expressed by matrix 12, was the which presented the best results, reaching 72.64% of GA and K = 0.61, being considered good according the evaluation criteria adopted. Therefore, satisfactory results were obtained, emphasizing that for the area, the variables derived from spectral bands of orbital sensors are essential for understanding the distribution of the soils in the landscape, in addition to being more effective for classification.

Keywords: Digital Soil Mapping. Predictive models. Decision trees. Coastal plain.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS 11
LISTA DE TABELAS E QUADROS 13
LISTA DE SIGLAS 14
INTRODUÇÃO 15
2 REFERENCIAL TEÓRICO 19
2.1 A Geografia e o estudo das paisagens 19
2.2 Ambientes Costeiros: definição, dinâmica e vulnerabilidades 23
2.3 Levantamentos e mapeamentos pedológicos 27
2.4 Mapeamentos Digitais de Solos 31
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 38
3.1 Climatologia 40
3.2 Geologia 42
3.3 Geomorfologia 45
3.4 Pedologia 47
3.5 Hidrografia 50
3.5 Vegetação 51
4 MATERIAIS E MÉTODOS 54
4.1 Materiais utilizados 54
4.1.1 *Softwares* e produtos de Sensoriamento Remoto 54
4.1.2 Materiais de Campo 55
4.2 Procedimentos metodológicos 56
4.2.1 Levantamento de Campo 56
4.2.2 Classificação dos Solos do Delta do Parnaíba 57
4.2.3 Mapeamento Digital dos Solos 60
4.2.3.1 Atributos/variáveis preditivas 60
4.2.3.2 Elaboração e análise das matrizes de dados 66
4.2.3.3 Método de Árvores de Decisão 70
4.2.4 Geração dos mapas pedológicos digitais 71
4.2.5 Avaliação e acurácia do mapeamento pedométrico 72
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 75

5.1 Variáveis derivadas do MDE 75
5.2 Variáveis derivadas da imagem Landsat 8 81
5.3 Treinamento dos dados 93
5.4 Mapeamento Digital de Solos no Delta do Parnaíba e avaliação da acurácia 100
CONSIDERAÇÕES FINAIS 115
BIBLIOGRAFIA CITADA: 117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura funcional do Geossistema 22
Figura 2 – A Pedometria em relação a outros campos da ciência. 35
Figura 3 – Localização da área de estudo 39
Figura 4 – Comportamento da Temperatura do Ar Atmosférico e Precipitação ao longo do ano no município de Ilha Grande – Piauí 42
Figura 5 – Mapa de Unidades Geológicas do Delta do Parnaíba 44
Figura 6 – Mapa das Unidades Geomorfológicas do Delta do Parnaíba 46
Figura 7 – Mapa Pedológico da Planície do Delta do Parnaíba 49
Figura 8 – Mapa de Cobertura das Terras do Delta do Parnaíba – PI 52
Figura 9 – Coleta de perfil de solo em trabalho de campo no Delta do Parnaíba-PI 56
Figura 10 – Localização dos pontos de coleta de amostras de solo 58
Figura 11 – Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno 61
Figura 12 – Exemplo de execução da função "*flow direction*". 62
Figura 13 – Exemplo de determinação do fluxo acumulado 63
Figura 14 – Esquema de uma árvore de decisão com quatro variáveis (x1, x2, x3 e x4) e três classes (A, B e C) 71
Figura 15 – Classes de altimetria do Delta do Parnaíba – Piauí 75
Figura 16 – Frequência das variáveis geomorfométricas por classes de (A) altimetria e (B) declividade 76
Figura 17 – Classes de declividade do Delta do Parnaíba – Piauí 76
Figura 18 – Classes de curvatura (forma do terreno) do Delta do Parnaíba – Piauí 77
Figura 19 – Frequência das variáveis geomorfométricas por classes de (A) curvatura e (B) direção de fluxo 77
Figura 20 – Direção de fluxo no Delta do Parnaíba – Piauí 78
Figura 21 – Fluxo acumulado no Delta do Parnaíba – Piauí 79
Figura 22 – Drenagem do Delta do Parnaíba 80
Figura 23 – Índice de umidade topográfica no Delta do Parnaíba – Piauí 81
Figura 24 – Banda 2 (*Blue*) do Landsat 8 do Delta do Parnaíba – Piauí 82
Figura 25 – Histograma e discretização das classes da banda 2 82
Figura 26 – Banda 4 (Red) do Landsat 8 do Delta do Parnaíba – Piauí 83
Figura 27 – Histograma de discretização das classes da banda 4 83
Figura 28 – Banda 6 (*Shortwave Infrared*) do Landsat 8 do Delta do Parnaíba – Piauí 84
Figura 29 – Histograma e discretização das classes da banda 6 84
Figura 30 – Banda termal do sensor TIRS do Landsat 8 do Delta do Parnaíba - Piauí. 85
Figura 31 – Histograma e discretização das classes da banda termal 86
Figura 32 – Índice "*Clay Minerals*". Razão de bandas: 6/7 87
Figura 33 – Índice *"Iron Oxide"*. Razão de bandas: 4/2 88
Figura 34 – Campos inundados no Delta do Parnaíba – Piauí (25/02/2016) 88
Figura 35 – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada do Delta do Parnaíba 89
Figura 36 – Histograma e discretização das classes do NDVI 90
Figura 37 – Índice de Umidade por Diferença Normalizada do Delta do Parnaíba 91

Figura 38 – Área de acumulação de água no período chuvoso no Delta do Parnaíba (a) 92
Figura 39 – Área de acumulação de água no período chuvoso no Delta do Parnaíba (b) 92
Figura 40 – Área de acumulação de água no período chuvoso no Delta do Parnaíba (c) 93
Figura 41 – Modelo classificador e conjunto completo de treinamento para a matriz de dados 4 96
Figura 42 – Matriz de confusão gerada pelo Weka para a matriz de dados 4 97
Figura 43 – Modelo classificador e conjunto completo de treinamento para a matriz de dados 8 98
Figura 44 – Matriz de confusão gerada pelo Weka para a matriz de dados 8 98
Figura 45 – Modelo classificador e conjunto completo de treinamento para a matriz de dados 12 99
Figura 46 – Matriz de confusão gerada pelo Weka para a matriz de dados 12 100
Figura 47 – Mapa pedológico digital gerado a partir da matriz de dados 4 101
Figura 48 – Mapa pedológico digital gerado a partir da matriz de dados 8 104
Figura 49 – Perfil representativo da classe RQo1 (Solos arenosos); (A) Perfil de solo P30; (B) e (C) paisagem do perfil 105
Figura 50 – Perfis representativos de ESPOSSOLO HUMILÚVICO; (A) P36; (B) P40.....105
Figura 51 – Perfil representativo de CY; (A) P41; (B) e (C) paisagem do perfil.....106
Figura 52 – Perfis representativos de SN (A) e VX (B); (A) P29; (B) P38 107
Figura 53 – GLEISSOLOS do Delta do Parnaíba; 108
Figura 54 – Mapa pedológico digital gerado a partir da matriz de dados 12 109
Figura 55 – Representativo da paisagem da classe H – Solos hidromórficos 111
Figura 56 – Representativo de Dunas Móveis no município de Ilha Grande – PI 111

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 – Comparação entre os mapeamentos pedométricos e convencionais 33
Tabela 2 – Informações descritivas de estudos em mapeamento digital de classes de solos realizados no Brasil 36
Tabela 3 – Área em quilômetros quadrados (km²) e porcentagem das classes de cobertura do Delta do Parnaíba – Piauí 51
Tabela 4 – Classificação dos solos do Delta do Parnaíba conforme SiBCS (*continua*)..... 59
Tabela 5 – Características espectrais dos instrumentos imageadores OLI e TIRS 64
Tabela 6 – Descrição das matrizes de dados para o 2º nível categórico..... 67
Tabela 7 – Descrição das matrizes de dados para unidades de mapeamento 67
Tabela 8 – Descrição das matrizes de dados para associações da paisagem 68
Tabela 9 – Classes de solo e número de observações por classe no 1º nível categórico para as amostras de treinamento 68
Tabela 10 – Classes de solo e número de observações por classe no 2º nível categórico para as amostras de treinamento 69
Tabela 11 – Qualidade de classificação segundo o índice Kappa 73
Tabela 12 – Resultados dos processamentos das matrizes de dados para o MDS do Delta do Parnaíba 94
Tabela 13 – Valores de índice Kappa para cada matriz de dados determinado pelo Weka 95
Tabela 14 – Matriz de confusão do conjunto de dados 4 (pontos classificados em campo) .. 102
Tabela 15 – Matriz de confusão do conjunto de dados 8 (pontos classificados em campo) .. 108
Tabela 16 – Matriz de confusão do conjunto de dados 12 (pontos classificados em campo) 110
Tabela 17 – Matriz de confusão da combinação entre mapa do conjunto 8 e mapa pré-existente 113
Tabela 18 – Matriz de confusão da combinação entre mapa do conjunto 12 e mapa pré-existente 114

Quadro 1 - Causas antrópicas da erosão costeira no Brasil 25
Quadro 2 – Abrangência da cobertura dos levantamentos pedológicos no território brasileiro 30

LISTA DE SIGLAS

AD – Árvores de Decisão

CCM – Complexo Convectivo de Mesoescala

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais

EG – Exatidão Global

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FURPA – Fundação Rio Parnaíba

GPS – Sistema de Posicionamento Global

IAC – Instituto Agronômico de Campinas

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IVs – Índices de Vegetação

LI – Linha de Instabilidade

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Mapeamento Digital de Solos

NDVI – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada

NDWI – Índice de Umidade da Diferença Normalizada

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

TFSA – Terra Fina Seca ao Ar

TWI – Índice de Umidade Tomográfica

UFPI – Universidade Federal do Piauí

USGS – *United States Geological Survey*

UTM – Universal Transversa de Mercator

VCAN – Vórtice Ciclone de Altos Níveis

WEKA – *Environment for Knowledge Analysis*

WGS – *World Geographic System*

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

INTRODUÇÃO

As atividades dos pedólogos incluem levantar e analisar as propriedades dos solos, bem como categorizá-los, classifica-los e mapear sua distribuição espacial, para assim compreendê-los e predizer o seu comportamento. Esses levantamentos servirão como base e contribuirão para os estudos geográficos, geológicos, biológicos e pedológicos, além de serem essenciais para a análise da aptidão para vários usos.

Todavia, no Brasil, os investimentos para o mapeamento e classificação de solos têm decrescido gradativamente, tendo como uma das principais justificativas os custos elevados. Como consequência, muitos dos levantamentos pedológicos são realizados apenas em escalas de reconhecimento e de nível exploratório. Por essa razão poucos pesquisadores e/ou órgãos de pesquisa utilizam mapas de solos para o planejamento (McBRATNEY; MENDONÇA-SANTOS; MINASNY, 2003). Além disso, o número de profissionais capacitados a realizar esses levantamentos vem sendo reduzido a cada ano. Para Höfig (2014), em linhas gerais, a organização de planos de ocupação do solo desconsidera a realidade geomorfológica e pedológica para a execução de um projeto.

Nowatzki (2013) ressalta que a demanda por mapeamentos de solos em escalas mais detalhadas torna-se necessária para embasar os estudos relacionados ao uso sustentável das terras, entre os diversos estudos envolvendo solos. Essa preocupação se dá porque determinados usos do solo contribuem significativamente para a contaminação dos recursos hídricos e, consequentemente, do ambiente, gerando prejuízos econômicos e sociais.

Nesse sentido, com o desenvolvimento tecnológico aliado à expansão das ciências e o advento do Geoprocessamento nos estudos pedológicos, alternativas para esse impasse surgiram, dentre elas a Pedometria. Essa técnica consiste na aplicação de métodos matemáticos e estatísticos para o estudo da gênese do solo assim como da sua caracterização têmporo-espacial (McBRANTNEY; MINASNY, 2013).

A utilização da Pedometria é capaz de aumentar a viabilidade de execução dos levantamentos de solos, tendo em vista a utilização de informações relacionadas à geologia, relevo, hidrografia, clima, vegetação, dentre outras, para a classificação. Ela visa otimizar tempo e recursos, assim como incrementar os trabalhos convencionais de Pedologia, possibilitando que áreas de maior abrangência sejam mapeadas (NOLASCO-CARVALHO; FRANCA-ROCHA; UCHOA, 2009).

A aplicação das técnicas de Pedometria depende do objetivo e do detalhe pretendidos para o mapeamento, visto que o uso final da informação do levantamento de solo determina a

exatidão necessária. Consequentemente, estas não podem ser aplicadas para qualquer situação sem que se considerem as necessidades específicas e a conveniência das hipóteses inerentes de cada técnica (McBRATNEY et al., 2000).

Ainda não há um conhecimento sistematizado sobre a variabilidade espacial do solo e, em especial, para os Mapeamentos Digitais de Solos (MDS) ainda não existe uma metodologia padrão de trabalho. Dentro do possível, esses procedimentos devem ser uniformizados e, além disso, é essencial que se forneçam critérios sólidos e racionais que justifiquem a continuidade dos financiamentos de projetos de MDS no Brasil, tendo em vista que a informação do solo norteia os planos em importantes decisões, como na apropriação de áreas de elevada fragilidade ambiental, a exemplo das zonas costeiras, que se caracterizam pelas mudanças constantes no tempo e alterações no espaço implicando diretamente na sua grande diversidade geológica, geomorfológica, pedológica e paisagística (ROSA, 2012).

Dessa forma, esta pesquisa, vinculada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Piauí (UFPI), tem como objeto de estudo os tipos de solos presentes no Delta do Parnaíba, zona costeira do estado do Piauí. O Delta está situado na porção norte do litoral piauiense e no nordeste setentrional do Brasil. A paisagem costeira piauiense é constituída por diversos ecossistemas frágeis e materiais pouco consolidados, possuindo uma elevada beleza cênica, onde diversos processos erosivos e de deposição atuam sobre ela, caracterizando, desta forma, um ambiente altamente dinâmico.

Sabendo da importância essencial do estudo das zonas costeiras e motivado em contribuir com o avanço da ciência do solo, principalmente no estado do Piauí, a delimitação da área em estudo levou em consideração os limites do Delta do Parnaíba em terras piauienses. A pesquisa foi estruturada partindo-se da seguinte hipótese:

1. Por se tratar de uma área aplainada, os atributos geomorfométricos e/ou topográficos existentes representam pequena diferenciação para discriminação das classes de solos da área de estudo, sendo os atributos derivados de imagens de sensores remoto orbitais mais eficientes na predição de classes de solo;

Nesse sentido, o objetivo geral da pesquisa é avaliar a resposta de produtos geomorfométricos e espectrais, por meio de diferentes técnicas de integração, para o mapeamento das classes de solo na área do Delta do Parnaíba.

Como objetivos específicos, busca-se:

1. Gerar atributos e/ou variáveis preditivas para o Mapeamento Digital de Solos da área;

2. Verificar quais atributos utilizados possui maior confiabilidade para discriminar e predizer as classes de solo da área de estudo;
3. Elaborar mapas digitais de solos para a área do Delta do Parnaíba – PI a partir dos métodos de Pedometria selecionados;
4. Comparar os mapas obtidos por Mapeamento Digital de Solos com o produzido pelo método tradicional;
5. Avaliar a acurácia dos mapas gerados por Pedometria a partir das metodologias selecionadas.

A opção pela temática tem como justificativa a premissa de que o Mapeamento Digital de Solos realizado com base nas técnicas de Pedometria mostra-se o mais adequado, além de acessível, para a classificação dos solos no Delta do Parnaíba, pois permite o estabelecimento de limites mais precisos e menos subjetivos entre os compartimentos pedológicos da área. Além de que, o levantamento de solos é essencial para o planejamento conservacionista de uso e cobertura da terra e também para a avaliação das áreas de maior fragilidade ambiental. Quando determinadas informações acerca dos solos não são levadas em consideração nos planos diretores, os ambientes ficam passíveis a cenários de perda de recursos naturais e degradação ambiental.

Em determinadas regiões do país alguns ambientes passam a ser ocupados de forma irregular e aleatória, em via das necessidades humanas que precisam ser atendidas. Nessa perspectiva, o mapeamento digital das classes de solos do Delta do Parnaíba visa contribuir para uma base de dados de solos em escala de maior detalhe e mais atualizada.

Espera-se que a pesquisa possa contribuir e despertar o interesse da comunidade científica com a temática, uma vez que mapeamentos dessa natureza podem abranger áreas maiores com o mesmo investimento usado em áreas menores, e que o monitoramento dos solos possa ser realizado de forma mais frequente. Ademais, as informações obtidas poderão vir a auxiliar governos, empresas, bem como a sociedade civil organizada na tomada de decisões e um planejamento mais adequado para a área.

Com base no exposto, o trabalho foi estruturado em cinco seções, onde na primeira, são apresentados os objetivos, problemática e justificativa da escolha do tema.

A segunda seção tratou de realizar um breve levantamento teórico acerca do estudo da Paisagem no âmbito das pesquisas em Geografia, especificamente da Geografia Física. Analisaram-se também os ambientes costeiros, sua dinâmica e vulnerabilidades, em especial a questão da erosão costeira. Por fim, discutiu-se sobre levantamentos pedológicos

convencionais e Mapeamentos Digitais de Solos, evidenciando algumas de suas principais metodologias de execução.

A seção três traz a caracterização da área de estudo, ressaltando os aspectos físicos, a fim de conhecer melhor, o espaço ao qual se foi estudado. Na sessão quatro são apresentados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa. Nessa sessão são apresentados, dentre outros aspectos, métodos de análises em laboratório e mapeamento de solos.

A seção cinco, como produto final da pesquisa, traz os resultados da geração das variáveis preditivas utilizadas, bem como o Mapeamento Digital de Solos do Delta do Parnaíba, destacando a acurácia do produto gerado.

As últimas seções tratam das conclusões e referências bibliográficas utilizadas no decorrer da pesquisa.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A Geografia como ciência de caráter eminentemente ambientalista permite no estudo da relação entre os homens e o meio natural a análise da expansão dos sítios urbanos e rurais, instalação de núcleos de colonização, implantação de sistemas produtivos tecnificados e suas inter-relações com os demais componentes do estrato geográfico (DIAS; SANTOS, 2007).

Nas atuais condições de crise ambiental e da civilização, quando há uma perda da capacidade produtiva dos sistemas econômicos, tem-se urgência em repensar os modelos e estilos de desenvolvimento. Para Rodriguez e Silva (2002), a sustentabilidade é vista como um paradigma no sentido de rever as interações da Sociedade com a Natureza, convertendo-se na bússola para a implantação dos processos de planejamento e gestão ambiental e territorial. Isto exige a aplicabilidade de sólidas fundamentações teóricas e metodológicas, sustentadas em visões holísticas, integradoras e sistêmicas das unidades ambientais naturais e sociais.

A ideia de ter uma visão integradora das interações da Natureza com a Sociedade nas discussões acadêmicas começou no final do século XVIII e princípio do século XIX, com os trabalhos de Kant, Humboldt e Ritter. A análise dessas interações foram empreendidas dentro do contexto da Geografia e tiveram como consequência o surgimento de duas formas de analisar a configuração do planeta Terra: uma visão voltada para a Natureza (com as concepções principalmente de Humboldt, e posteriormente do russo Dokuchaev), firmando as bases para a Geografia Física e a Ecologia Biológica, e uma visão centrada no Homem e na Sociedade, que foi a concepção da Geografia Humana ou a Antropogeografia de Karl Ritter. Ambas as formas e mesmo a noção de paisagem tiveram sempre uma visão fortemente dualista. (RODRIGUEZ; SILVA, 2002).

2.1 A Geografia e o estudo das paisagens

O termo paisagem é profundamente utilizado em Geografia, a partir do século XIX, e, em geral, se concebe como “conjunto de formas que caracterizam um setor determinado da superfície terrestre” (PASSOS, 2013, p. 34). Além disso, foi utilizada nos relatos históricos no período de “descobrimento do novo mundo” quando havia a necessidade de descrição de lugares intocados e com biodiversidade antes nunca vista (MYANAKI, 2003). Nesse momento, as paisagens foram concebidas como representação artística presentes nas primeiras pinturas que descreveram a diversidade do Brasil. Nesse contexto, a paisagem também tem sido empregada interdisciplinarmente quando se discute a beleza cênica de determinada área

relacionando diversos ramos científicos como arquitetura, geografia, biologia e as artes de um modo geral.

A partir desta concepção que considera puramente as formas, o que se destaca é a heterogeneidade da homogeneidade, de maneira que se podem analisar os elementos em função da sua forma e magnitude, para assim, obter uma classificação de diferentes paisagens.

De acordo com Dias e Santos (2007), a polissemia da noção de paisagem apresenta a possibilidade de leitura da expressão da interação de sistemas naturais-sociais através da abordagem sistêmica. Essa proposta desempenha um papel epistemológico, prático e de grande importância na análise da construção da paisagem. Nesse contexto, Moreira (2007) destaca a importância da paisagem como categoria e método na formulação de hipóteses científicas e na discussão de seus elementos.

A evolução do estudo da paisagem no âmbito da Geografia conduziu a melhor definição do conceito a partir do questionamento da dicotomia entre paisagem humana e paisagem natural, embora a visão da paisagem natural predominasse como elemento ideográfico e descritivo. As escolas alemãs e russas se desenvolveram em torno dessa discussão originalmente e interagiram posteriormente com a escola francesa que se desenvolvia paralelamente. Nesse sentido, a noção de paisagem, designada com o termo alemão *Landschaft* foi desenvolvida por Humboldt e posteriormente pelos estudiosos Dokuchaev, Passarge e Berg (MENDONÇA; VENTURI, 1998).

O entendimento deste termo expressava a ideia da interação entre todos os componentes naturais (rocha, relevo, clima, água, solo e vegetação) e um espaço físico concreto. Este conceito integrador expressava nova visão da Geografia Física em contradição com a visão tradicional da análise isolada dos componentes naturais, que não permitia a interpretação das influências mútuas entre os componentes naturais, empreendidos sob uma visão metafísica e mecanicista (GOMES, 1997).

Ao aproximar o objeto de estudo da Geografia com o conceito de paisagem, estabelece-se profunda relação entre as duas realidades, ao colocar que a Geografia estuda a fisionomia do globo procurando explicar a sua correlação, tanto no conjunto terrestre como nos quadros regionais. Guerra e Marçal (2012) colocam que, com base nas orientações teórico-metodológicas das escolas de Geografia Física (com destaque para a germânica, francesa, russa e americana), o desenvolvimento e aplicação do conceito de paisagem foram construídos de forma diferenciada, em distintos horizontes epistemológicos, de acordo com seu tempo específico.

Dessa forma, a abordagem morfológica da paisagem perdura até metade da década de 1920, quando então incorpora uma visão mais integradora entre as partes que a compõem, destacando, ao mesmo tempo, sua função na natureza. O período que se segue é marcado pela Teoria Geral dos Sistemas, estabelecida pelo biólogo Ludwig Von Bertalanffy (1932), que traz uma nova orientação aos estudos da paisagem sob uma perspectiva sistêmica e dinâmica entre os componentes da natureza (GUERRA e MARÇAL, 2012).

Na Geografia, a incorporação da visão sistêmica, o Geossistema, foi apresentada pelo russo Sotchava na década de 1960, marcando um novo período de análise da paisagem. Utilizando-se da teoria sobre paisagens (*Landschaft*), o autor interpretou essa herança sob uma visão da Teoria Geral de Sistemas. Isso significava que o conceito de *Landschaft* (paisagem natural) foi considerado como sinônimo da noção de geossistema. Nesse sentido, a paisagem era considerada como uma formação sistêmica, formada por cinco atributos sistêmicos fundamentais: estrutura, funcionamento, dinâmica, evolução e informação (RODRIGUEZ; SILVA, 2002).

Partindo dessa premissa, a Geografia Física renovou suas concepções conceituais e de metodologia, promulgando a importância dos estudos integrados da paisagem e sua respectiva interação com as atividades humanas. O aspecto inovador na ciência geográfica foi realizar uma releitura da Teoria Geral dos Sistemas, obtidas através dos estudos dos geógrafos Georges Bertrand (1972) e Sotchava (1977 e 1978), com a introdução do conceito de Geossistemas para a denominação dos sistemas ambientais, apresentando-se como melhor instrumento metodológico para a abordagem das questões ambientais no âmbito da Geografia Física (ARAÚJO, 2007; RODRIGUEZ E SILVA, 2002).

A partir dessa releitura e seguindo princípios da teoria Geossistêmica, Bertrand (1972) define paisagem como resultado da combinação dinâmica, portanto instável, dos elementos físicos, biológicos e antrópicos que, reagindo dialeticamente uns sobre os outros, tornam-se um conjunto único e indissociável.

Através dessa análise da paisagem, o Geossistema pode ser considerado como o resultado da interação dos dados ecológicos estáveis como relevo, clima e hidrologia, também denominados de potencial ecológico, e de dados instáveis como a exploração biológica, ou seja, que sofrem influências da flora, fauna e exploração dos solos através das atividades antrópicas, de modo dialético (SOUSA, 2017). A figura 1 ilustra a estrutura funcional do Geossistema com base em Bertrand (1972).

Os geossistemas conseguem expressar a dinâmica dos elementos constituintes do meio físico biótico em associação às atividades humanas, configurando um determinado

estágio de evolução da paisagem. No tocante à dinâmica dos geossistemas, os trabalhos desenvolvidos por Tricart (1977) são essenciais para a elaboração de um diagnóstico do estado de conservação dos recursos naturais, partindo da avaliação das limitações e potencialidades dos mesmos, e também, quanto às formas de uso e cobertura da terra.

A partir do desenvolvimento desses conceitos expostos pela Teoria Geral dos Sistemas, e consequentemente o desenvolvimento da mesma, no âmbito da Geografia Física através da formulação da Teoria Geossistêmica, o objetivo básico e fundamental da abordagem física geográfica é o estudo dos geossistemas, tendo em vista que os mesmos fornecem as informações sobre a dinâmica da natureza, possibilitando assim, o planejamento para o uso prudente do espaço geográfico (NASCIMENTO; SAMPAIO, 2005).

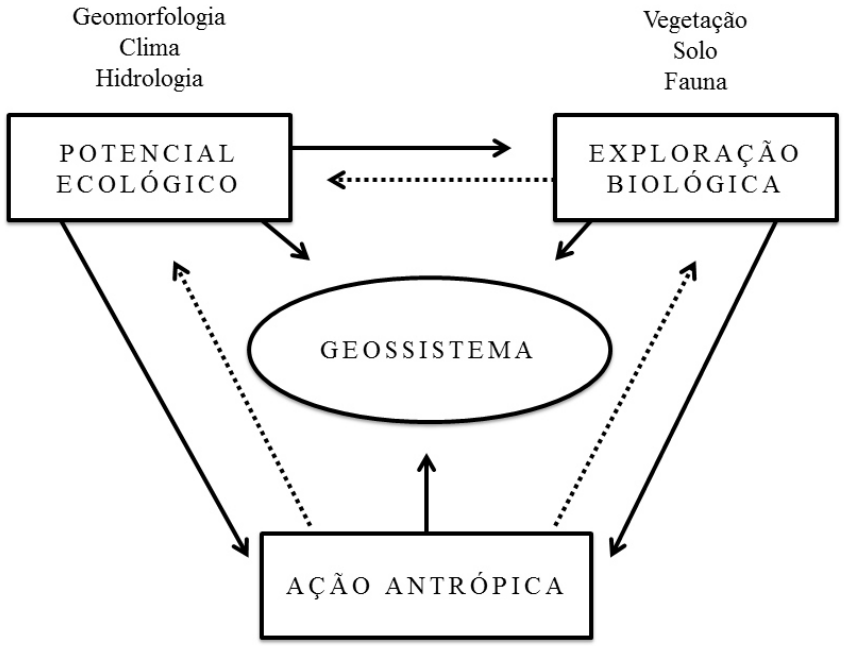


Figura 1 - Estrutura funcional do Geossistema

Fonte: Bertrand (1972).

Por esta razão, ao considerar a atual postura da Geografia Física frente às problemáticas ambientais, admite-se que tais questões devam ser trabalhadas sob a óptica sistêmica, na qual a dinâmica do todo difere do comportamento das partes individualizadas. Como exemplos de sistemas geoambientais, destacam-se as zonas costeiras, entendidas a partir da complexidade da interface entre os sistemas atmosféricos, continentais e hidrológicos. Para Meireles (2012), sua análise demanda uma perspectiva sistêmica dos diferentes ecossistemas e feições que a dão forma. Para isso, reconhecer suas partes e integra-

las dentro de um sistema maior possibilita entender os processos responsáveis por sua dinâmica.

2.2 Ambientes Costeiros: definição, dinâmica e vulnerabilidades

As zonas costeiras constituem ecossistemas únicos e irreconstituíveis à escala humana, resultantes de uma longa evolução, de muitos milhões de anos, sendo suas características impostas pela atuação de diversos processos da geodinâmica interna e externa ao longo do tempo geológico (DIAS, 2005). Para Muehe (2001), possuem uma importância ambiental bastante significativa, configurando-se como um ambiente de amortecimento energético da ação das ondas, dotados de condição excepcional para se ajustar às mudanças do nível do mar. Ademais, são ecologicamente relevantes por representar importante habitat de vasta biota de flora e fauna como manguezais e manchas residuais de mata atlântica.

Atualmente diversos são os critérios utilizados para a definição da zona costeira, no entanto, na literatura ainda não há um consenso para aquisição de um conceito base para a mesma. De maneira singela, conforme destacado em Gruber et al.,(2003) a zona costeira pode ser entendida como um espaço formalmente definido como resultante da interação do continente, com a atmosfera e o meio marinho sendo, portanto, uma das áreas de maior interação de energia e matéria.

Por constituírem ambientes de formação geológica recente com grande variabilidade natural, apresentam ecossistemas, em geral, fisicamente inconsolidados e imaturos, o que termina lhes conferindo inúmeras características de vulnerabilidade e fragilidade que, aliadas a um consumo de recursos sempre crescente aliado à expansão do capital, e com impactos previstos de mudanças climáticas, tendem a uma situação de desequilíbrio bastante elevado, como apontam Carvalho e Fontes (2007).

Para Polette (1997), os ambientes costeiros apresentam alto valor natural ao combinar potencialidades turísticas, habitacionais e de ocupação humana, contrastando com a baixa potencialidade agrícola que a mesma apresenta. São áreas que apresentam um conjunto complexo de alta relevância ambiental e que, portanto, merece atenção de todos os agentes transformadores desse espaço, e o do poder público em especial, o que justifica sua inserção como patrimônio nacional no art. 225, § 4º da Constituição Federal.

Tendo em vista o grau de importância o qual esses ambientes são atribuídos, viu-se a necessidade de gerenciar de forma integrada, descentralizada e participativa, as atividades socioeconômicas estabelecidas na zona costeira, garantindo assim, a utilização sustentável

destas, por meio de medidas de controle, proteção, preservação e recuperação dos recursos naturais e dos ecossistemas já em estado de degradação (FROTA, 2017). De acordo com o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC), esse gerenciamento pode ser entendido como "um conjunto de atividades e procedimentos que, por meio de instrumentos específicos, permite a gestão da utilização dos recursos da zona costeira" (BRASIL, 1990, p.4).

Para isso, no entanto, é necessário realizar diagnósticos físico-conservacionistas que servirão como base para a implantação de políticas públicas e/ou iniciativas privadas de preservação, proteção e manutenção dessas áreas. Florenzano (2008) ressalta que caracterizar os ambientes costeiros atuais e pretéritos é importante, pois permite a reconstrução histórica da geologia do ambiente, além de fornecer subsídios que podem propiciar intervenções que minimizem o impacto negativo para a sociedade e futuras gerações, sobretudo no que diz respeito à ocupação desordenada e mau gerenciamento dos recursos.

A zona costeira em si, apresenta uma enorme fragilidade em função de sua suscetibilidade, por se configurar como um ambiente transicional, ou seja, essa unidade geográfica é bastante vulnerável a fenômenos naturais ligados à dinâmica costeira, denotados de processos de erosão e deposição, inundação costeira, incidência de ventos, maré, ondas, dentre outros processos (MAZZER; DILLENBURG; SOUZA, 2008). No entanto, o desenvolvimento e a execução de atividades humanas acabam por impor pressões sobre essas áreas naturais, representando uma grande perda da qualidade ambiental.

A esse respeito Cavalcanti e Camargo (2002) ressaltam que os impactos ambientais induzidos pela pressão antrópica são extremamente significativos nas áreas costeiras, ocasionando problemas muitas vezes superiores à capacidade de assimilação dos sistemas naturais, o que imprime vários impactos negativos, como a locação de materiais impróprios, suporte da infraestrutura e modificação do escoamento superficial e da drenagem subterrânea, e o desmatamento de áreas naturais.

Diante dessas novas formas e intenções de uso e ocupação, as zonas costeiras passaram a ser expostas a grandes fragilidades e os impactos resultantes principalmente da urbanização nessas áreas vêm sendo amplamente discutidos na literatura por diferentes autores como Bird (1984), Moraes (2007), Araújo e Freire. (2007), Gomes (2007), Corrêa e Fontenelle (2010) Silva e Lima (2013), dentre outros, que visam ações para remediar e até prevenir os efeitos desses impactos gerados na zona costeira.

Um dos principais problemas costeiros da atualidade é a erosão costeira. Esse fenômeno consiste em um conjunto de processos que incluem a desagregação de partículas de material rochoso ou terroso/arenoso e seu consequente transporte e desgaste por diversos

agentes como a água, o vento e a gravidade. A erosão pode ocorrer essencialmente de forma natural ou induzida. Esta última, ocorrendo quando os processos são catalisados pela ação do homem (SILVA et at., 2004; SIMÕES, COIADO, 2003; ROCHA, 2017).

A erosão costeira ocorre quando os sedimentos são trabalhados pela energia cinética de agentes diversos. De acordo com Rocha (2017) esse fenômeno é um dos principais problemas costeiros de áreas urbanizadas, causando sérios danos econômicos. Os problemas relacionados à erosão costeira são cada vez mais frequentes nas orlas de urbanização consolidadas e, por sua dinâmica e vulnerabilidade, as menores alterações podem ter grandes consequências nesses lugares, o que intensifica os processos e desenvolve sérios problemas.

Ainda com base no autor, nesses locais, as áreas de acentuada dinâmica, como as faixas de praia, não tem seus limites respeitados, provocando reflexos imediatos na disponibilidade de sedimentos e, consequentemente, no recuo da linha de costa, que destrói estruturas urbanas e causa prejuízos de ordem social e econômica. Assim, o processo erosivo pode comprometer as atividades produtivas desenvolvidas nessas áreas. O quadro 1 evidencia algumas das principais causas antrópicas da erosão costeira no Brasil.

Quadro 1 - Causas antrópicas da erosão costeira no Brasil

	Causas antrópicas da erosão costeira no Brasil:
1	Urbanização da orla, com destruição de dunas e / ou impermeabilização de terraços marinhos holocênicos e eventual ocupação da pós-praia.
2	Implantação de estruturas rígidas ou flexíveis, paralelas ou transversais à linha de costa: espigões, molhes de pedra, enrocamentos, píers, quebra-mares, muros, etc., para "proteção costeira" ou contenção/mitigação de processos erosivos costeiros ou outros fins; canais de drenagem artificiais.
3	Armadilhas de sedimentos associadas à implantação de estruturas artificiais, devido à interrupção de células de deriva litorânea e formação de pequenas células.
4	Retirada de areia de praia por: mineração e/ou limpeza pública, resultando em déficit sedimentar na praia e/ou praias vizinhas.
5	Mineração de areias fluviais e desassoreamento de desembocaduras; dragagens em canais de maré e na plataforma continental: diminuição/perda das fontes de sedimentos para as praias.
6	Conversão de terrenos naturais da planície costeira em áreas urbanas (manguezais, planícies fluviais/ e lagunares, pântanos e áreas inundadas) provocando impermeabilização dos terrenos e mudanças no padrão de drenagem costeira (perda de fontes de sedimentos).
7	Balanço sedimentar atual negativo de corrente de intervenções antrópicas.

Fonte: Souza et al., (2005); Souza et al., (2009), adaptado pelo autor.

Em se tratando de região Nordeste, onde a ocupação é aspecto histórico e secular, a pressão sobre esses ambientes intensifica-se. O desenvolvimento de atividades produtivas como a cana-de-açúcar, a carcinicultura, a pecuária, o turismo e a própria expansão das cidades, ocupando extensas faixas de terra sobre tabuleiros costeiros, dunas, mangues e restingas contribui ainda mais para a degradação ambiental desses ambientes (OLIVEIRA, 2011).

Em caso específico, no estado do Piauí, também é observada forte ocupação costeira por parte de condomínios, resorts e principalmente aglomerados urbanos que se espalham por diversas áreas que apresentam fragilidade elevadas. Além disso, nas zonas costeiras, principalmente nas áreas próxima a linha de costa, verifica-se a multiplicação irregular de edificações residenciais e de serviços sem infraestruturas de saneamento, que além de avançar sobre ambientes como: mangues, restingas e lagoas, lançam esgoto, queimam as matas como forma de limpeza de áreas para construção e implantação de jardins e edifícios, o que acarreta uma crescente degradação ambiental com a redução das praias, assoreamento dos rios, contaminação dos lençóis freáticos e redução dos recursos naturais (FROTA, 2017).

Seguindo a linha da Teoria Geossistêmica, vários autores têm realizado estudos integrados de modo a compreender a dinâmica das paisagens, sobretudo em áreas costeiras. Esses trabalhos têm sido elaborados e apresentados à sociedade com o intuito de subsidiar atividades futuras no âmbito do planejamento territorial e ambiental e aperfeiçoamento dos modelos de gestão. Como exemplos, pontuam-se as propostas de análise e zoneamento geoambientais estabelecidas por Rivas (1996), Fundação CEPRO (1996), Muehe (1998), MMA (2002), Cavalcanti e Camargo (2002), Tagliani (2002), Tessler e Goya (2005), Santos (2012), Paula (2013), Sousa (2015), Frota (2017), Frota, Amorim e Valladares (2017) e Cabral (2018).

O conhecimento sobre as diferentes variáveis ambientais que compõem a paisagem (geologia, clima, relevo, hidrografia, solos, vegetação, entre outros) assume extrema importância na adoção de práticas de manejo sustentáveis nas áreas costeiras, buscando equilíbrio com o meio ambiente. Para Arruda (2012), através das pesquisas de levantamento e mapeamento, problemas como erosão, contaminação do lençol freático, baixa produtividade em locais de alto potencial produtivo, entre outros fatores de ordem ambiental podem ser reduzidos ou mesmo evitados. Diante disso, previnem riscos provenientes do uso inadequado do mesmo, permitindo a viabilização de projetos que apontam para a conservação ambiental.

2.3 Levantamentos e mapeamentos pedológicos

O solo é um corpo tridimensional formado na superfície terrestre, por meio da interação dos fatores ambientais (material de origem, clima, relevo, organismos) agindo ao longo do tempo, com variação espacial e resiliência a perturbações. Porém, capaz de ser destruído. Sua formação natural decorre da interação entre os fatores ambientes que condicionam a ação de processos pedogenéticos (KÄMPF; CURI, 2015). É um recurso natural lentamente renovável, que pode mudar rapidamente suas propriedades com a ação antrópica. Assim, o solo pode ser um produto de processos naturais, bem como da intervenção humana.

Para Espíndola (2008), antes de chegar à condição de ser estudado na conformação de uma ciência – como a Pedologia –, muitas vezes o solo foi considerado um simples meio de suporte às plantas, ou um fornecedor de elementos nutritivos, ou ainda um simples manto de intemperismo das rochas. Nesse sentido, sua definição varia de acordo com a especialidade, formação, utilidade e ponto de vista com que tal recurso é analisado. O seu cultivo serve de base à produção de alimentos e matérias primas industrializável. Sua capacidade de absorção e armazenamento de água proveniente das chuvas, por exemplo, previnem inundações catastróficas. Atuam como filtros mantendo a pureza de águas subterrâneas, além de funcionarem como amortecedores de mudanças ambientais. Para os geógrafos, é o suporte onde as sociedades humanas se estruturam, extraem os recursos para a sobrevivência e organizam o espaço físico territorial (HÖFIG, 2014; KÄMPF, CURI, 2015).

Nessa perspectiva, os solos constituem um dos bens mais valiosos e merecedores de proteção. Para isso, é necessário um conhecimento adequado de suas propriedades, funções e potencialidades. Este é o objetivo da Pedologia, ramo da Ciência do Solo que estuda suas características, evolução e ocorrência, suas capacidades e limitações de uso pelas sociedades, bem como sua classificação e espacialização na paisagem.

Para se ter conhecimento das informações dos solos de determinada região, o pedólogo desenvolve sistemas taxonômicos para melhor orientar as tomadas de decisões. A demanda por dados de levantamento de solos para subsidiar o planejamento e a modelagem ambiental tem crescido mundialmente. Os mapas de solos são instrumentos essenciais para quando se busca, por exemplo, utilizar as terras de maneira sustentável, evitando problemas de erosão e poluição.

Como supracitado, o solo é um elemento resultado basicamente das ações do tempo e do clima, por meio do intemperismo, sobre o material de origem (a rocha) em determinada

posição do relevo que muitas vezes é utilizado sem se levar em consideração tais fatores que lhe dão origem. O paradigma de gênese do solo concebido por Dokuchaev (1883) e equacionado por Jenny (1941) fornece uma estrutura conceitual para o entendimento da formação do solo (KÄMPF & CURI, 2015). Entende-se o solo como um corpo natural organizado (DOKUCHAEV, 1883), no qual o clima e os organismos são fatores ativos que atuam durante determinado tempo e em certas condições de relevo sobre o material de origem, que é fator de resistência (LEPSCH, 2010).

Trabalhar com o solo partindo de uma abordagem sistêmica é uma etapa fundamental para o seu equilíbrio no ambiente. A ideia de sistemas nos estudos de Geografia remonta à década 1930, com Bertalanffy e a sua Teoria Geral dos Sistemas. De maneira geral, pode-se afirmar que essa teoria se pauta na ideia que fenômenos naturais devem ser organizados como sistemas abertos que se baseiam na troca de matéria e energia. A compreensão da natureza deve se dar a partir da inter-relação entre seus elementos (AQUINO et al, 2015).

Christofoletti (1980) define um sistema como um conjunto dos elementos e das relações entre si e seus atributos. Dessa forma, objetivando um planejamento para o desenvolvimento adequado das formas de ocupação do espaço, é necessário que se busque a análise integrada de todos os componentes da paisagem, dentre eles o solo, pois tais componentes permitem compreender a intensidade das alterações no ambiente ao longo do tempo (TRICART, 1977).

Inserir a Pedologia em tal análise apenas se faz possível por meio dos levantamentos pedológicos, inventários cartográficos de Pedologia que têm por objetivo gerar conhecimento a respeito da distribuição espacial dos solos e seus potenciais ambientais, a partir de informações sobre sua formação e constituição (LEPSCH, 2011). Para a confecção dessas representações os pedólogos identificam os solos que existem em determinada área e decidem uma forma de grupar aqueles com perfis mais semelhantes, tendo em vista a dificuldade de delimitar, em certos casos, as unidades de um único tipo de solo.

Os levantamentos de solo clássicos ou convencionais envolvem pesquisas em gabinete, campo e laboratório. Compreendem o registro de observações, análises e interpretações do meio físico e de características morfológicas, físicas, químicas, mineralógicas e biológicas dos solos, buscando à sua caracterização, classificação e principalmente sua representação cartográfica. Identificam solos com o objetivo de separar unidades de mapeamento, ou seja, áreas heterogêneas em parcelas mais homogêneas, que apresentem a menor variabilidade possível, em função dos parâmetros de classificação e das características utilizadas para distinção dos solos (IBGE, 2007).

De acordo com Ker et al. (2017), os levantamentos pedológicos requerem um estreito entendimento da relação solo-paisagem, componentes covariantes como relevo, vegetação, drenagem, uso da terra e suas interações são também estudados e utilizados na predição da ocorrência dos trajetos a serem percorridos em campo. O trabalho de levantamento equivale assim à leitura interpretativa do que a natureza apresenta, ou seja, as características e a distribuição dos solos na paisagem como resultado de milhares de milhões de anos de pedogênese, incluindo a interação homem-solo, reflexo da história socioeconômica de uma região.

Segundo Dias (2015), em sua etapa inicial, o trinômio "escala - precisão - objetivos" deve ser definido, compreendendo escala e nível de detalhe ou generalização do mapa, a densidade de observações e o método de prospecção de campo que será adotado. Durante as atividades de campo que definem e descrevem os pontos amostrais, o pedólogo busca relacionar o solo e as diferentes paisagens onde ele ocorre, estabelecendo assim a distribuição espacial, a extensão e os limites entre as unidades de mapeamento do produto final (RESENDE et al., 2007).

Essas unidades de mapeamento podem ser inferidas a partir de fotointerpretação e sobreposição de dados ambientais e cartográficos, que são associados com base no conhecimento e na experiência do pedólogo (EMBRAPA, 1995; FLORENZANO, 2007). O mapeamento de solos, portanto, exige grande conhecimento deste recurso por parte daquele que irá realizá-lo.

Após esse processo, os solos são então classificados segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, considerando diversas características diagnósticas, tais como abundância e qualidade de material orgânico nos horizontes superficiais, espessura e número de horizontes, cor, material de origem, entre outros (COELHO, 2010).

Por fim, compreende um mapa com legenda e um texto explicativo, que define, descreve e interpreta, para diversos fins, as classes de solos componentes das unidades de mapeamento. O mapa ou carta é parte fundamental de um levantamento. Mostra a distribuição espacial de características dos solos e a composição de unidades de mapeamento, em termos de unidades taxonômicas, ressaltando, também, características do meio ambiente (IBGE, 2007).

As cartas pedológicas são definidas como a aplicação sintética das informações pertinentes à formação e distribuição geográfica dos diferentes solos existentes em uma localidade. Podem ser classificadas em diversos tipos de acordo com a qualidade ou quantidade de informações demandadas, e se diferenciam principalmente quanto aos objetivos

que se destinam e quanto à extensão das áreas que abrangem. Para cada tipo de levantamento há um tipo de mapa de solos, o qual é designado pelo nome do levantamento correspondente (LEPSCH, 2002; IBGE, 2007).

Com base na experiência em diversos tipos de levantamentos pedológicos executados no Brasil, IBGE (2007) e Embrapa Solos (AGLIO et al., 2015) evidenciaram a seguinte cobertura de levantamentos de solos por nível de detalhamento para o território nacional (quadro 2).

Quadro 2 – Abrangência da cobertura dos levantamentos pedológicos no território brasileiro

Levantamentos Pedológicos	**Escala**	**Faixas de observação**	**Área Mínima Mapeável**	**Abrangência**
				%
Detalhados	≥ 1:20.000	≥ 4 observações/ha	< 1,6ha	0,0003
Semidetalhados	≥ 1:50.000	0,02 – 0,20 observações/ha	< 10ha (para a escala ≥ 1:50.000)	0,61
Reconhecimentos de Alta Intensidade	entre 1:50.000 e 1:100.000	0,04 - 2 observações/km²	10ha a 40ha	1,6
Reconhecimentos de Média Intensidade	entre 1:100.000 e 1:250.000	0,04 - 2 observações/km²	40ha a 2,5km²	8,2
Reconhecimentos de Baixa Intensidade	entre 1:250.000 e 1:750.000	0,04 - 2 observações/km²	2,5 a 22,5km²	9,7
Exploratórios	entre 1:750.000 e 1:2.500.000	≥ 0,04 observações/ km²	22,5 a 250km²	94

Fonte: IBGE (2015); Aglio et al., (2015).

Devido à complexidade, todo esse processo de produção tradicional dos mapas de solo não permite rápidas execuções, atualizações e baixo custo. Demandam tempo, além de ser um processo subjetivo e propenso a erros durante o procedimento de delineamento dos limites das unidades de solo (ZHU et al., 2001). Além disso, os mapeamentos convencionais foram criticados por empregar modelos mentais, fundamentados na experiência do pedólogo, e não em modelos que possam ser reproduzidos, sendo possível avaliar somente o resultado final e não a sua qualidade (CEDDIA, 2013; SILVA, 2016).

Assim, Bonisch, Monteiro e Câmara (2004) e McBratney et al. (2000) ressaltam que no passado os métodos convencionais de levantamentos de solos foram criticados por serem

muito qualitativos nas caracterizações, além de muito onerosos. Porém, nos últimos anos, observa-se o desenvolvimento de modelos quantitativos, que vem auxiliando os estudos pedológicos de um modo geral, categorizados em um novo ramo da ciência do solo conhecido como Pedometria.

2.4 Mapeamentos Digitais de Solos

A Pedometria, ou Pedologia quantitativa, ganha espaço como uma área na qual o mapeamento de solos é otimizado através da aplicação do conhecimento em Pedologia. Consiste em uma evolução da mesma e agrega a esse tema assuntos como modelagem matemática, sensoriamento remoto, estatística e/ou geoestatística e sensoriamento proximal[1], para que se possa caracterizar a transição que ocorre no solo ao longo do tempo (LAGACHERIE; McBRATNEY, 2007). A Pedometria faz uso de informações coletadas ou já disponíveis em locais de observações de solo, e a partir delas, procura-se ajustar um modelo quantitativo com as variáveis ambientais do local de estudo. Essas metodologias são relacionadas às funções de predições de propriedades, e, ou, classes de solo para o restante da área (DALMOLIN; TEN CATEN, 2015; KER et al., 2017). A partir desse processo os Mapeamentos Digitais de Solos são efetivados.

Embora este conceito venha sendo aplicado e testado ao longo de cerca de 20 anos, ainda ficam alguns questionamentos acerca dos parâmetros e das metodologias aplicadas e, sobretudo, sobre a confiabilidade dos produtos gerados por estas técnicas (KER et al., 2017). Alguns desconfiam da ausência de padrão nos trabalhos contrapondo-se ao método tradicional cujo protocolo de execução é antigo e uniforme.

MacMillan (2008) detalhou os procedimentos do MDS em seis passos:

1º - definir os objetivos do mapeamento (ou seja, predizer as classes de solos e suas propriedades);

2º - definir e obter dados de entrada ou variáveis preditivas (relevo, sensor remoto, geologia, mapas existentes etc.) a serem utilizadas, além da informação de referência sobre as classes de solo e suas propriedades;

3º - desenvolver equações ou regras de classificação para predizer as classes ou propriedades dos solos;

[1] As técnicas de sensoriamento proximal de solo mais estudadas utilizam princípio óptico (reflectância espectral), elétrico (condutividade elétrica) e eletroquímico (eletrodos íons-seletivos) (GEBBERS; ADAMCHUK, 2010). O desempenho dessas tecnologias em laboratório tem demonstrado um razoável potencial de predição de atributos químicos e físicos do solo, abrindo precedentes para o uso dessas ferramentas diretamente no campo (VISCARRA ROSSEL et al., 2006).

4º - aplicar essas equações ou regras;

5º - avaliar a acurácia da predição comparando com dados de referência; e

6º - gerar os mapas finais.

Observando os passos, é possível perceber que a maior diferença entre o mapeamento digital e o tradicional é o modelo utilizado. O mapeamento de solos tradicional é baseado no modelo "ClORPT" e suas diretrizes foram estabelecidas por Dokuchaev nos primórdios da Ciência do Solo. O modelo estabelece que o solo é o resultado da interação entre cinco fatores : clima (*climate* - Cl), organismos (*organisms* – O), relevo (*relief* – R), material de origem (*Parent material* – P) e tempo (*time* – T). Os quatro primeiros fatores interagem entre si ao longo do tempo e criam processos específicos que levam a diferenciação em horizontes e consequentemente a pedogênese (MENDONÇA-SANTOS & SANTOS, 2003).

Jenny (1941) estabeleceu a seguinte equação para descrever o processo de formação do solo:

$$\mathbf{S = f\ (ClORPT)}$$

Para equacionar quantitativamente a asserção de Jenny (1941), McBratney et al. (2000) propuseram aliar o conhecimento pedológico sobre os processos de formação e a distribuição dos solos na paisagem (ClORPT - clima, relevo, organismos, material de origem e tempo) com técnicas usadas em Pedometria, com a finalidade de predizer com maior rapidez e precisão, e a um custo mais baixo, as classes de solos ou as propriedades destes para uma determinada região, da seguinte forma:

$$\mathbf{Sc = \mathit{f}\ (s,c,o,r,p,a,n)}$$

A classe do solo (Sc) seria então uma função do solo (s); clima (c); organismos (o); relevo (r); material de origem (p); tempo (a) e posição espacial (n) e propõe explicar as relações entre os fatores de formação do solo, bem como predizer de forma quantitativa as relações entre as classes ou propriedades dos solos e o ambiente, espacialmente (SARMENTO, 2010). A inclusão da posição espacial proporcionou a integração dos SIGs, desempenhando papel de ferramenta indispensável no MDS (DIAS, 2015).

De acordo com Ker et al. (2017) a maioria dos trabalhos realizados no país com base no modelo S.C.O.R.P.A.N utiliza mapas temáticos digitais relativos aos fatores de formação do solo. Estes constituem planos de informação que são cruzados em ambiente SIG.

Para Chagas (2006), a abordagem pedométrica para o mapeamento do solo é bastante diferente da abordagem convencional. Essas diferenças ressaltam que: o levantamento de solos convencional é baseado na fotointerpretação e predição de tipos de solos, enquanto as técnicas pedométricas são principalmente, baseadas nas propriedades do solo, produzidas com a utilização de alguma técnica geoestatística. Para o autor, o levantamento convencional produz mapas de polígonos de solos e os produtos das técnicas pedométricas são mapas de propriedades dos solos de grande escala. A tabela 1 ilustra as diferenças entre o mapeamento convencional e o pedométrico.

Tabela 1 – Comparação entre os mapeamentos pedométricos e convencionais

Etapas	**Mapeamento Convencional**	**Mapeamento Pedométrico**
Preparação e planejamento do Projeto	Identificação dos fatores de formação dos solos (conceito de catena)	Identificação dos tipos de variáveis ambientais dos solos
Dados auxiliares utilizados (pré-processamento)	Fotointerpretação e levantamento de reconhecimento	Imagem de sensores remotos; atributos do terreno derivados de MDEs; dados geológicos, dentre outros.
Esquema de amostragem	Amostragem livre	Amostragem baseada em um esquema (amostras aleatórias, amostras estratificadas ao acaso) ou baseada em um modelo (estratificação igual da área em estudo)
Aquisição de dados de campo	Navegação usando fotografias aéreas	Navegação utilizando um SIG
Organização e entrada dos dados	Designação das unidades de mapeamento e de suas composições	Análise dos dados e interpolação usando alguma técnica geoestatística
Apresentação e distribuição dos produtos do levantamento de solos	Mapa de polígonos com atributos das propriedades dos solos (médias)	Mapas de grande escala das variáveis dos solos com estimativas da incerteza (mapeamento temático)

Fonte: Hengl (2003); Chagas (2006).

Höfig (2014) afirma que os novos pedólogos devem possuir conhecimento para realizar levantamentos de solos por metodologias convencionais e por mapeamentos digitais de solos, uma vez que estas são complementares: as convencionais produzem as informações que são utilizadas para treinar os modelos e predizer classes e propriedades de solos em áreas não mapeadas, ao passo que o método digital visa mapear grandes áreas otimizando recursos

(TEN CATEN, 2011a). É fundamental a utilização de metodologias modernas que visam minimizar estas dificuldades.

Nesse contexto, o Geoprocessamento tem um grande potencial no levantamento de solos, devido à velocidade do processamento das informações e ao grande volume de dados que estas ferramentas podem gerar, além de fornecerem, associadas às informações em diferentes escalas, a precisão dos mapas gerados.

Ker et al., (2017) salientam que a facilidade de manuseio de mapas digitais em SIG tem encorajado o cruzamento de mapas temáticos, sendo o resultado frequentemente interpretado como expressão da relação solo-paisagem de uma região. Todavia, o bom conhecimento dessa relação, aspecto indispensável para o mapeamento de solos, requer percepção no campo para cada local de levantamento, pela observação da verdade terrestre.

Esta nova abordagem deve contemplar conhecimento matemático e estatístico, mas principalmente, pedológico. O que se tem observado, na aplicação dos MDS, no Brasil, são os mapeamentos de propriedades do solo que quase sempre tomam como base informações oriundas de mapeamentos pedológicos preexistentes. Por esse motivo, os pedólogos que se utilizam de métodos convencionais são fundamentais para que os produtos do Mapeamento Digital de Solos não se tornem apenas teóricos, mas que gerem e aperfeiçoem conhecimento a respeito do solo e de suas interações com o ambiente (ROSA, 2012).

Segundo Dias (2015) o mapeamento de solos está cada vez mais sofisticado e interdisciplinar, como consequência desse processo de evolução. Atuando como elo para troca de informações entre especialistas de solos e do meio físico como geomorfólogos e geólogos, dentre outros profissionais da ciência. A figura 2 representa esquematicamente a Pedometria em relação a outros campos da ciência.

Com base na abordagem de alguns trabalhos de MDS realizados no Brasil, evidenciada na tabela 2, incluindo modelos preditivos (regressões logísticas, árvores de decisão e redes neurais artificiais), bem como a utilização de fatores de formação do solo, Ten Caten et at. (2012) concluíram que os atributos do relevo, frequentemente expressos pelos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) foram empregados na totalidade dos trabalhos, ao passo que os fatores “material de origem” e “clima”, por exemplo, foram utilizados com menor intensidade.

Para Sirtoli et al. (2008), em geral, os métodos que definem unidades homogêneas, de acordo com um modelo morfológico, tem mostrado um potencial para melhorar a predição de ocorrência das classes de solos, visto que a sua posição na paisagem influencia os processos de formação e os atributos pedológicos. Segundo este autor, o uso de modelos de

paisagem, como técnica auxiliar em levantamentos de solos, constitui uma evolução no entendimento das relações solo-geomorfologia e consequentemente, uma ferramenta importante para identificar e mapear áreas de solos homogêneos.

Os modelos digitais de terreno fornecem informações sobre a topografia, e produtos derivados, tais como a clinografia, que através de histogramas ou áreas de referência permite fazer a comparação com os mapas de solos tradicionais. Tanto as áreas de referência quanto os histogramas precisam de um amplo conhecimento da área de estudo para delinear amostras ou para classificar os solos (VALLADARES; HOTT, 2008).

A grande vantagem do mapeamento digital de solos apontada por Coelho (2010) é a possibilidade de utilizar a modelagem para extrapolar os limites para áreas adjacentes ao mapa utilizado como referência, partindo da premissa que são áreas de mesma fisiografia, resultando em ganho de informações para áreas que não tinham informações alguma das classes de solos.

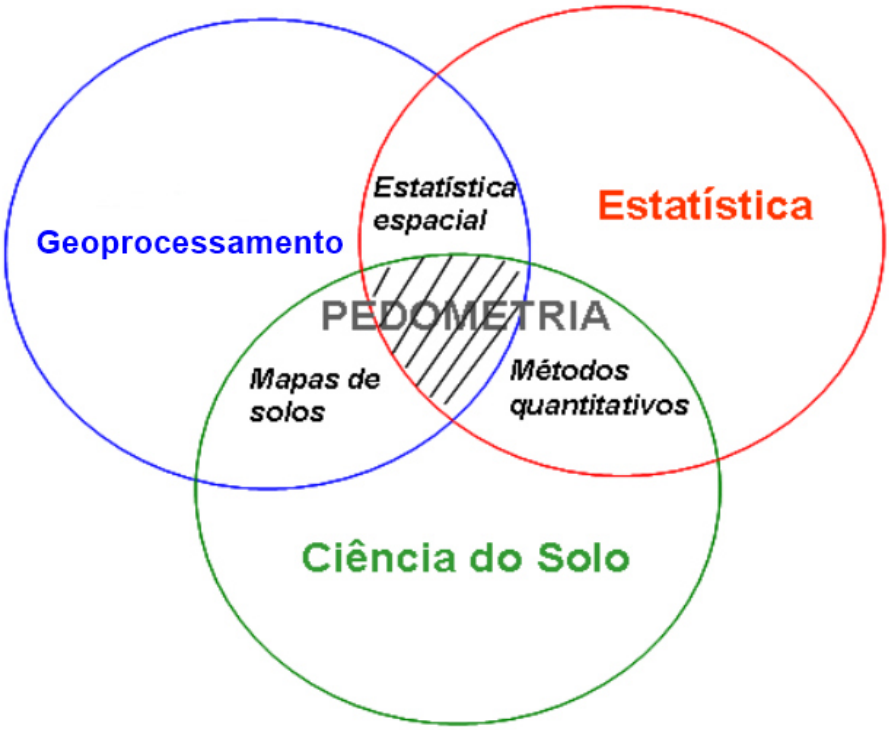


Figura 2 – A Pedometria em relação a outros campos da ciência.

Fonte: Coelho (2010), adaptado de Hengl (2003).

Tabela 2 – Informações descritivas de estudos em mapeamento digital de classes de solos realizados no Brasil (*continua*)

Estudos	Modelos	Fatores	Atributos utilizados	Locais	Escala/ resolução espacial	Área (km²)
GOMES et al. (2019)	ADE	r, c, s, p	hip, dec, pla, per, pod, com, umi, geo, veg, sol, ndvi	Território brasileiro	1km	8.500.000
SILVA et al. (2018)	TAB	r	hip, pla, per, pla dec, acu, com, pod, umi	Alto curso da Bacia do Córrego Quatro Pontes (PR)	1:50.000	34,24 km²
SILVA (2016)	TAB	r, p	hip, dec, pla, per, pod, com, umi, geo, veg	Reserva Natural Papagaio-da-cara-roxa (PR)	1:25.000	1.181,07
DIAS et al. (2016)	ADE, NEU	r, s, p	hip, dec, ele, pla, per, umi, dis, orv, geo, oxi, agr, ndvi	Microrregião de Montes Claros (MG)	90m	1.102,89
HÖFIG; GIASSON; VENDRAME (2014)	ADE	r, s, p	ele, dec, pla, per, orv, dis, dir, acu, com, umi, geo	Sentinela do Sul e Cerro Grande do Sul (RS)	1:50.000	281,96 e 324,74
NOWATZKI; SANTOS (2014)	TAB	r, s	hip, pla, per, pla dec, acu, com, pod, umi	Bacia hidrográfica do Rio Pequeno (PR)	1:25.000	112,8
VALLADARES (2012)	KRI	s	sol,	Tabuleiros Costeiros, região do baixo Acaraú (CE)	1:100.000	1.067,22
CARVALHO JUNIOR et al. (2011)	NEU	r, s	ele, dec, pla, per, cur, asp, acu, dir, elr, deh	Extremo norte do Estado do Rio de Janeiro.	1:250.000	164,7
GIASSON et al.(2011)	ADE	r, s	dec, pla, per, umi, cur, dir, acu, com, pod	Bento Gonçalves (RS)	1:10.000	6,14
TEN CATEN et al. (2011b)	REG	r, c, s	ele, dec, pla, per, dis, con, umi, sed, rad	São Pedro do Sul (RS)	1:50.000	874
TEN CATEN et al. (2011c)	REG	r, c, s	ele, dec, pla, per, dis, con, umi, sed, rad	São Pedro do Sul (RS)	1:50.000	874
TEN CATEN et al. (2011d)	REG	r, c, s	ele, dec, pla, per, dis, con, umi, sed, rad	São Pedro do Sul (RS)	1:50.000	874
SILVEIRA (2010)	NEU, TAB	r, s	hip, pla, per, pla dec, acu, com, pod, umi	Bacia hidrográfica do arroio do Corvo (PR)	1:10.000	4,473

Tabela 2 – Informações descritivas de estudos em mapeamento digital de classes de solos realizados no Brasil (*conclusão*)

Estudos	Modelos	Fatores	Atributos utilizados	Locais	Escala/ resolução espacial	Área (km²)
CHAGAS et al. (2010)	NEU	r, p, o, s	ele, dec, pla, umi, asp, geo, arg, oxi, ndv	Bacia hidrográfica do Rio São Domingos (RJ)	1:100.000 a 1:50.000	9,9
COELHO & GIASSON (2010)	REG, ADE, BAY, CAR, LMT	r, s	dec, pla, per, umi, cur, dir, acu	Ijuí, Bozano e Coronel Barros (RS)	1:50.000	1.018
CRIVELENTI et al. (2009)	ADE	r, p	dec, pla, per, dis, con, geo	Carta topográfica Dois Córregos (SP)	1:100.000	772
CARVALHO et al.(2009)	NEB	r, p, o	ele, dec, geo, veg	Mucugê (BA)	1:50.000	382,2
VALLADARES; HOTT (2008)	NEB	r	ele, cur, dec	Centro APTA de Frutas, Jundiaí (SP)	1:10.000	0,59
FIGUEIREDO & GIASSON (2008)	REG	r, s	dec, pla, per, dis, umi, dir, acu, com	Ibirubá e Quinze de Novembro (RS)	1:80.000	720
GIASSON et al. (2006)	REG	r, s	dec, pla, per, umi, cur, dir, acu, com, pod	Sentinela do Sul (RS)	1:50.000	253

LEGENDA: REG: regressões logísticas múltiplas, ADE: árvore de decisão, BAY: classificação Bayes, CAR: classificação hierárquica CART, LMT: classificação hierárquica LMT, NEU: redes neurais, NEB: lógica nebulosa, TAB: tabulação cruzada, KRI: krigagem, r: relevo, c: clima, s: solo, p: material de origem, o: organismos, ele: elevação, dec: declividade, hip: hipsometria, pla: curvatura planar, per: curvatura de perfil, dis: distância à drenagem, con: área de contribuição, umi: índice de umidade topográfica, sed: capacidade de transporte de sedimento, cur: curvaturas combinadas, dir: direção de fluxo, acu: fluxo acumulado, com: comprimento de fluxo, pod: índice de poder de córrego, orv: orientação das vertentes, asp: aspecto, geo: geologia, arg: índice de argila, oxi: óxido de ferro, ndv: NDVI, veg: vegetação, rad: radiação relativa disponível, elr: elevação relativa, deh: distância euclidiana à hidrografia, sol: solo.

Fonte: Ten Caten et al. (2012), adaptado pelo autor

A partir dos trabalhos citados e relacionados na tabela 2, tomaram-se suas análises, experiências, metodologias e considerações acerca do MDS para que o mapeamento do Delta do Parnaíba possa chegar a resultados satisfatórios e alcançar os objetivos propostos.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Delta do Parnaíba está localizado na planície costeira do estado do Piauí que fica situada na porção norte do litoral piauiense e no nordeste setentrional do Brasil. Esta se localiza a nordeste da costa brasileira, no limite dos estados do Piauí e Maranhão. Encontra-se próximo a linha do Equador e na região climática influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), *El niño*, e o Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul. Possui forma assimétrica. A vazão do rio encontra-se disposta a ondas de SO e correntes de O-NO (Corrente Norte do Brasil) (SZCZYGIELSKI et al, 2014).

A área em questão merece destaque pela importância socioeconômica e ambiental que representa para o Estado, tendo em vista a diversidade de ambientes e sistemas naturais que ali se encontram e que subsidiaram atividades econômicas importantes, a exemplo da turística, dentre outras.

Nesse litoral foi criada a Área de Proteção Ambiental Delta do Parnaíba (APA) pelo Decreto Federal de 28 de Agosto de 1996, envolvendo municípios do Maranhão, Piauí e Ceará, num total de 313.809 hectares e perfazendo um perímetro de 460.812 m, incluindo uma faixa de área marítima. No Piauí, a APA abrange parte dos municípios de Parnaíba, Luís Correia, Ilha Grande de Santa Isabel e Cajueiro da Praia.

O Delta do Parnaíba fica em uma zona de transição de acordo com suas condições climáticas e oceanográficas. Sua área total é de cerca de 2.700 km², sendo que sua maior parte está situada no estado do Maranhão e apenas 35% dessa área se encontra em território piauiense, formando pequenas ilhas e a Ilha Grande de Santa Isabel. Esta ilha se encontra entre o canal principal do rio Parnaíba e o canal secundário de leste: o rio Igaraçu. O rio Parnaíba possui uma moderada descarga de sedimentos em suspenção a qual é principalmente atribuída a geologia e condições climáticas da sua bacia de drenagem (SILVA et al., 2014; SILVA, 2015).

Para o desenvolvimento da pesquisa foi selecionada a área localizada na parte oriental do Delta, inserida nos limites do estado do Piauí, de aproximadamente 260 km², com praias de até 200 m de largura e ilhas barreiras, que caracterizam a geomorfologia costeira (SZCZYGIELSKI et al., 2014). A figura 3 a seguir ilustra a localização da área.

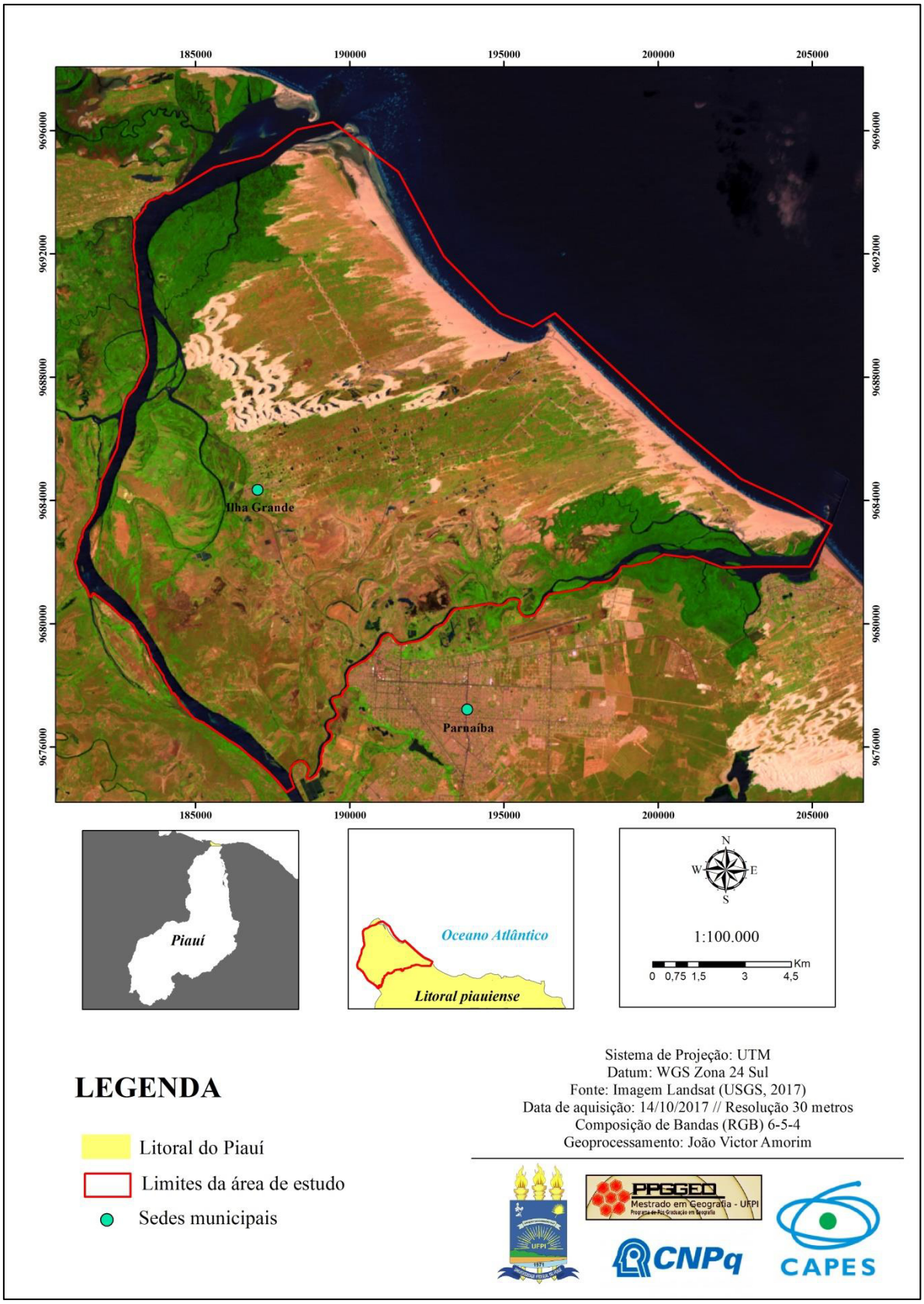


Figura 3 – Localização da área de estudo

Fonte: *U.S. Geological Survey* (2017), adaptado pelo autor.

A caracterização dos atributos geoambientais que dão forma à paisagem é de extrema importância na sua compreensão, pois o entendimento do quadro real e atual da paisagem só é possível quando se tem o conhecimento de todos os elementos que a constituem. Dessa forma, sabendo que a planície costeira do estado do Piauí apresenta ambientes distintos, dentre eles o Delta do Parnaíba, que se diferenciam especificamente de acordo com as condições físicas dispostas ao longo da costa, procurou-se, nessa seção, realizar-se uma caracterização de tais aspectos físicos que incorporam a área de estudo, considerando-se o clima, a geologia da área, o relevo, a distribuição hídrica e a vegetação.

3.1 Climatologia

As zonas costeiras são espaços ambientais diferenciados, onde interagem os meios continentais, atmosféricos e oceanográficos, que provocam mudanças significativas na morfologia das praias, entre outras feições. As variáveis meteorológicas ditam o ritmo de tais transformações, uma vez que interferem diretamente na disponibilidade e movimentação dos sedimentos em todo o litoral. Algumas variáveis atmosféricas como precipitação, umidade, evaporação e velocidade dos ventos são responsáveis pela entrada, saída e permanência de sedimentos na faixa de praia. Além disso, induzem mudanças no comportamento dos parâmetros oceanográficos como, por exemplo, na atuação dos eventos sobre o processo de formação de ondas (ROCHA, 2017).

De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da área está enquadrado como do tipo Aw', tropical, com chuvas distribuídas sazonalmente registrando máximas no outono, sendo possível identificar duas estações bem definidas: uma chuvosa durante os primeiros meses do ano, de janeiro a maio, e outra seca que ocorre no segundo semestre, de julho a dezembro. Mendoça e Danni-Oliveira (2007) classificam o clima da área como Tropical Equatorial com 6 (seis) meses secos.

Para Ferreira e Melo (2005) tais chuvas estão associadas a sistemas atmosféricos que atuam sobre a área, sendo: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que, durante os meses de março a abril, estimula a formação de nuvens por convecção, causando consequente precipitação, Vórtices Ciclones de Altos Níveis (VCANs), Linhas de Instabilidade (LI), os Complexos Convectivos de Meso-escala (CCMs) e as Frentes Frias.

Os Vórtices Ciclones de Altos Níveis (VCANs) são um conjunto de nuvens com forma aproximada a de um círculo girando no sentido horário. Na sua margem há formação de nuvens causadoras de chuva e no centro há movimentos de ar de cima para baixo

(subsidência), aumentando a pressão e inibindo a formação de nuvens. De acordo com Ferreira e Melo (2005) os VCANs que penetram na região Nordeste do Brasil formam-se no oceano Atlântico, principalmente entre os meses de novembro e março, e sua trajetória normalmente é de leste para oeste, com maior frequência entre os meses de janeiro e fevereiro.

As Linhas de Instabilidade (LI) caracterizam-se por bandas de nuvens causadoras de chuva. Sua formação é dada basicamente pelo fato de que, com a grande quantidade de radiação solar incidente sobre a região tropical, ocorre o desenvolvimento das nuvens do tipo cumulus, que atingem um número maior no período da tarde e início da noite, quando a convecção é máxima, ocasionando chuvas (FERREIRA; MELO, 2005).

Os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) são aglomerados de nuvens que se formam devido às condições locais favoráveis como temperatura, pressão, relevo, dentre outros, e provocam chuvas fortes e de curta duração, normalmente acompanhadas de fortes rajadas de vento (FERREIRA; MELO, 2005).

De acordo com Cavalcanti (1996) a área possui índices elevados de precipitação pluviométrica, tratando-se de uma área privilegiada, porém ao longo do ano é bastante irregular, onde as chuvas dividem o ano em dois períodos distintos: o período chuvoso, que se inicia em dezembro e se prolonga até abril ou maio, com precipitações de grande intensidade, com máxima de 298.4 mm no mês de março. E o período seco, que corresponde aos meses de junho até novembro, quando as precipitações são esparsas alcançando a mínima de 1.1 mm no mês de setembro.

Para a análise dos dados climáticos da área de estudo foram analisados os dados das Normais Climatológicas do Brasil para o período de 1981 a 2010 (BRASIL, 2018). Esses dados foram obtidos das estações meteorológicas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no Estado do Piauí, onde os dados extraídos representam o comportamento da chuva e da temperatura ao longo do ano. Os valores obtidos das médias climatológicas são valores calculados a partir de uma série de dados de 30 anos observados e podem ser visualizados na figura 4, que segue.

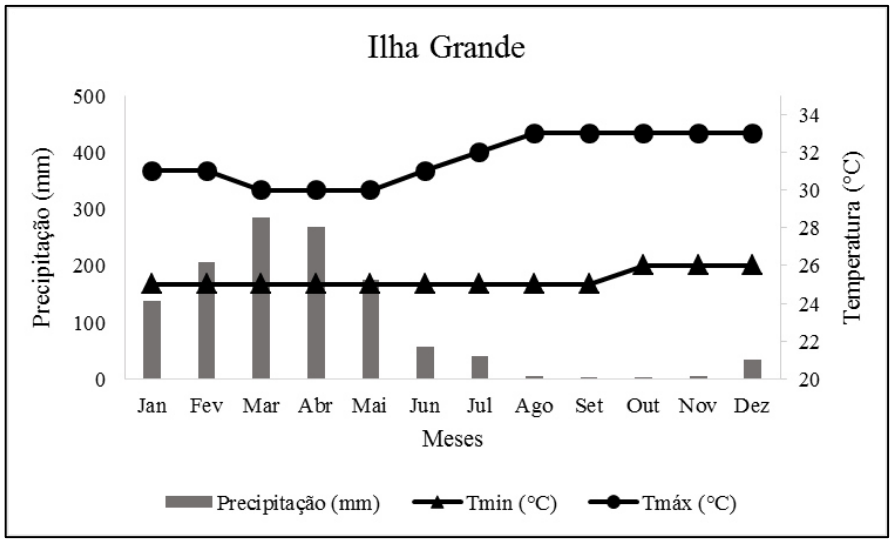


Figura 4 – Comportamento da Temperatura do Ar Atmosférico e Precipitação ao longo do ano no município de Ilha Grande – Piauí

Fonte: INMET/CFS/Interpolação.

As condições climáticas do município de Ilha Grande (com altitude da sede a 10m acima do nível do mar) apresentam temperaturas mínimas de 25ºC e máximas de 33ºC, com clima quente tropical. A precipitação pluviométrica média anual é definida no Regime Equatorial Marítimo, com isoietas anuais entre 800 a 1.600 mm, cerca de 5 a 6 meses como os mais chuvosos e período restante do ano de estação seca. O trimestre mais úmido é o formado pelos meses de fevereiro, março e abril.

3.2 Geologia

O geossistema Delta do Parnaíba está localizado na Planície Costeira do estado do Piauí. A estrutura geológica na qual está assentado é a bacia do Maranhão-Piauí. Essa bacia apresenta 600.000 km² e está inserida na Província Sedimentar do Meio-Norte. A bacia conta com um substrato representado por maciços arqueanos, crátons sisbrasilianos e cinturões orogênicos brasilianos sobre este substrato, implantaram-se estruturas derivadas de grábens no Mesoproterozóico, Neoproterozóico e no Fanerozóico (FROTA, 2017).

De acordo com dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (2006) em mapeamento feito em escala de 1:1.000.000, o Delta do Parnaíba é dividido em três unidades litoestratigráficas, sendo elas: i) Depósitos litorâneos, compostos de areias finas e grossas e por dunas móveis, estando localizados próximo a linha de costa; ii) Paleodunas,

compostos por areias bem selecionadas, quartzosas ou quartzofeldspáticas e; iii) Depósitos de pântanos e mangues, compostos por areia, silte, argila e material orgânico.

Para Cavalcanti (2000) os aspectos geológicos da planície costeira do estado do Piauí estão relacionados às coberturas da era Cenozóica e abrangem o período Quaternário. No período Quaternário, de acordo com relatórios do projeto RADAMBRASIL (1981), são encontrados os depósitos sedimentares recentes, tais como do tipo aluvial, estes que são representados pelas áreas de acumulação de sedimentos quaternários de constituição litológica areno-argilosa mal selecionados, de granulometria fina a grossa, cuja topografia baixa e plana ocasiona frequentes inundações por ocasião das cheias, por essas características apresenta bom potencial para águas subterrâneas.

No trecho de ocorrência de sedimentos do período do Quaternário, de acordo com Santos Filho et al. (2010) podem ser observadas particularidades predominantes como uma área praiana com algumas formações rochosas *(beach rocks)* na localidade denominada Pedra do Sal, município de Parnaíba (PI).

No mapeamento de Valladares e Cabral (2017) realizado em escala de 1:100.000 e ilustrado na figura 5, a área de estudo foi caracterizada em sete (7) unidades geológicas, sendo: Delta e Canais Fluviais; Depósito Litorâneos de Praias Recentes (Q2lp); Depósitos Eólicos Litorâneos Móveis (Q2e); Depósitos Eólicos Litorâneos Fixos (Qe); Depósitos fluvioaluvionares (Qfa); Depósitos de Pântanos e Mangues (Qpm); e Depósitos arenosos (Qd).

Ao observar-se o mapa, percebe-se que os Depósitos Fluvioaluvionares (Qfa) são os mais representativos na área, abrangendo 94,99 km² o que corresponde a cerca de 37,89% da área. Os depósitos litorâneos fixos (Qe) e os depósitos de pântanos e mangues (Qpm) são também bastante representativos na área de estudo correspondendo a respectivamente 17,71% e 16,71% da área, conforme Valladares e Cabral (2017). Nota-se que os depósitos litorâneos fixos representam a superfície de deflação da planície costeira, sendo estes seguidos dos Depósitos Litorâneos de praias recentes (Q2lp). Vale ressaltar também que esta unidade por possuir campos naturais é bastante utilizada para a prática de pecuária extensiva e está predominantemente sobre Neossolos Quartzarênicos.

Os Depósitos Eólicos litorâneos móveis (Q2e) abrangem 10,45 km² da área de estudo e representam cerca de 4,17% da área Estes são constituídos, predominantemente, por sedimentos holocênicos, areno-quartzosos, de granulometria fina e média, que sofrem bastante influência dos ventos que sopram de nordeste e sudoeste, variando bastante de acordo com o período do ano, conforme ressalta Pinheiro et al. (2013).

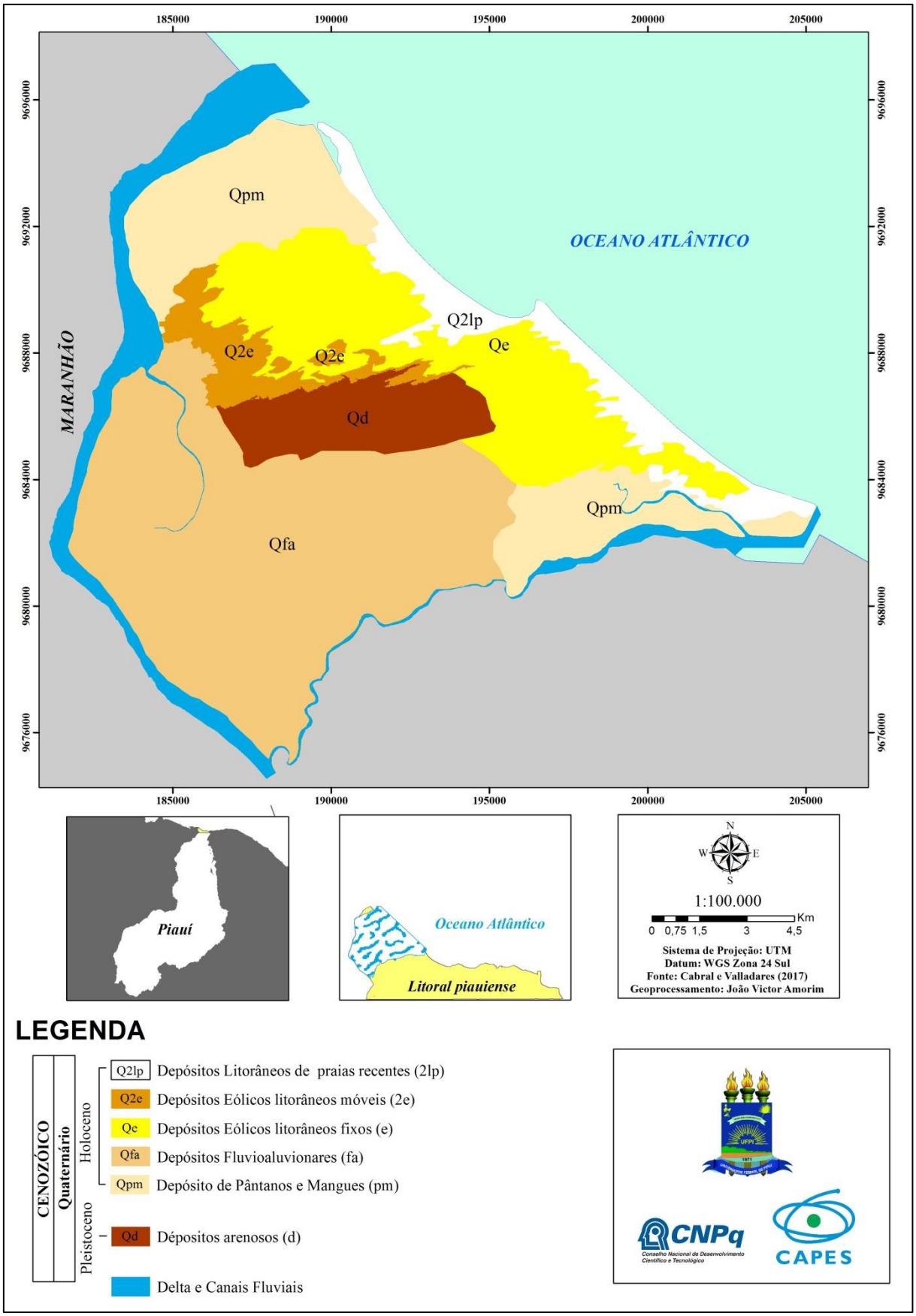


Figura 5 – Mapa de Unidades Geológicas do Delta do Parnaíba

Fonte: Valladares e Cabral (2017), adaptado pelo autor.

Os Depósitos Litorâneos de praias recentes é a unidade situada mais próximo da linha de costa, constituída por sedimentos marinhos arenosos (areias finas e grossas), depositados pela deriva litorânea e que são constantemente mobilizados pela ação eólica e retrabalhados pela abrasão marinha na faixa praial, sendo classificados como ambiente instável onde os processos morfogenéticos são intensos (RADAMBRASIL, 1981; SOUSA, 2015).

3.3 Geomorfologia

As unidades geomorfológicas que compõem a área em estudo compreendem os relevos de agradação. Os relevos de agradação são aqueles em que predominam os processos deposicionais, tanto do tipo continental como é o exemplo da planície fluvial, quanto do tipo litorâneo como é o caso da planície costeira, da planície fluvio-marinha, das planícies coluvio-aluvio-marinhas e as planícies flúvio-lagunares, além de dunas móveis, cordão arenoso e praias (RADAMBRASIL, 1981; SOUSA; VALLADARES, 2016).

Embasado no mapeamento realizado por Sousa (2015), é possível identificar 9 (nove) unidades geomorfológicas na área de Delta do Parnaíba, sendo: Cordão arenoso; Delta e canais fluviais; Dunas estabilizadas; Dunas móveis; Paleodunas; Praia; Planície eólica; Planície fluvio-marinha e; Planície e terraço fluvial (figura 6).

As planícies fluviais abrangem 94,57 km², representando 37,46% da área de estudo. De acordo com informações do RADAMBRASIL (1981) compreendem superfícies sub-horizontais, com gradientes suaves e convergentes em direção aos canais-troco, e correspondem às áreas nas proximidades do rio Parnaíba e Igaraçu, com relevo plano resultante da acumulação fluvial, sujeita a inundações periódicas. Apresentam as melhores condições de solos e de disponibilidade hídrica.

A segunda unidade de maior representatividade, Planície Eólica, se estende por 46,17 km², representada por áreas aplainadas entre as dunas constituídas de sedimentos eólicos em laminações lisas, bem como estratificações cruzadas truncadas entre as dunas ativas.

A planície flúvio-marinha (25,56 km²; 10,12% da área) desenvolve-se da combinação de processos continentais e marinhos cujos agentes fluviais, terrestres e oceânicos propiciam a formação de um ambiente lamacento, encharcado, úmido, rico em matéria orgânica e com vegetação de mangue.

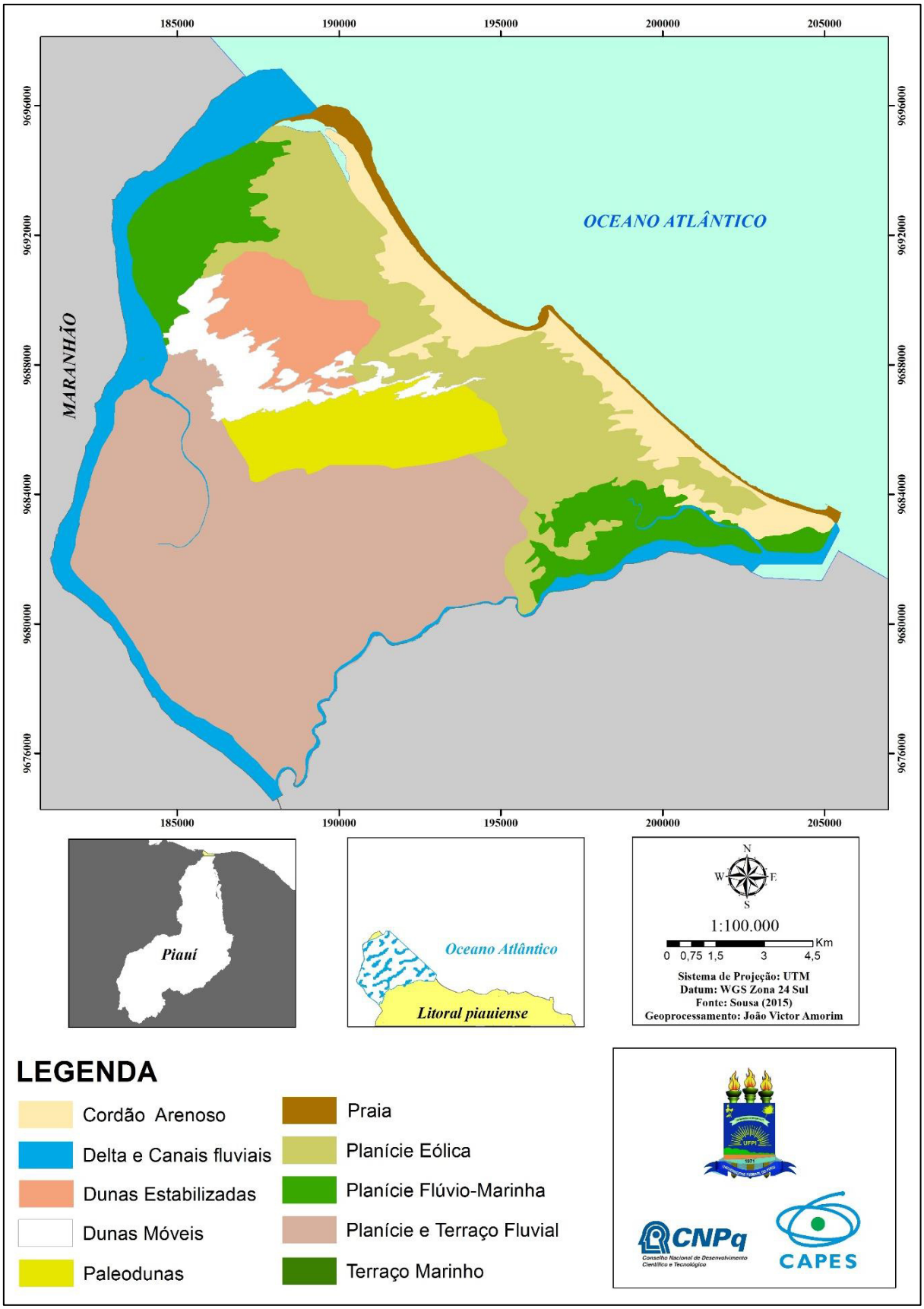


Figura 6 – Mapa das Unidades Geomorfológicas do Delta do Parnaíba

Fonte: Sousa (2015), adaptado pelo autor.

Além disso, possui terrenos muito mal drenados com padrão de canal bastante meandrantes e divagantes. Presença de superfícies de aplainamento, sob influência de refluxo de marés (RADAMBRASIL, 1981).

As dunas móveis caracterizam-se pela ausência de vegetação e partem geralmente da linha de praia, onde a ação dos ventos é mais intensa, para o continente. Segundo Paula (2013) as dunas eólicas da área de estudo são originadas por processos eólicos de tração, saltação e suspensão subaérea, sendo formados por areias esbranquiçadas, bem selecionadas, de granulação fina a média, quartzosas, com grãos de quartzo foscos e arredondados, e representam 4,13% do total da área.

Os cordões arenosos associados a praias e linhas de costa correspondem a estreitos e alongados depósitos arenosos em contato direto com a faixa de praia, sendo considerado o depósito continental mais próximo do mar. Correspondem a 6,65% da área, estendendo-se por 16,80 km² (SOUSA, 2015).

As praias são acumulações de areias que ficam entre a base das ondas modais e o limite do espraiamento e que são depositadas principalmente pelas ondas, mas também são influenciadas pelas marés e pela topografia (SHORT, 2006). Estas unidades estão vinculadas aos processos dinâmicos compostos pelas ações dos agentes de transporte, erosão e deposição, tendo como causas originais a variação do nível do mar, que está relacionada diretamente com as variações climáticas, a corrente de deriva litorânea, a influência das marés, o comportamento climático, a ação eólica e a ação antrópica.

3.4 Pedologia

Com base no reconhecimento exploratório de solos do estado do Piauí realizado por Jacomine (1986) as associações de solos predominantes no Delta do Piauí são: Neossolos Quartzarênicos; Gleissolos Sálicos; e Planossolos Nátricos, adaptando a taxonomia para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018).

Conforme descrito no mapeamento exploratório, os Neossolos Quartzarênicos são solos arenosos essencialmente quartzosos, profundos, excessivamente drenados, ácidos a fortemente ácidos e de muito baixa fertilidade natural. Esses solos compreendem tanto as dunas fixas como as dunas móveis. São solos originados de dunas antigas já fixadas pela vegetação. São solos desprovidos de minerais primários facilmente decomponíveis e de muito baixa fertilidade natural. Além disso, são solos que apresentam um baixo aproveitamento

tanto para agricultura como para a pecuária, por serem fortemente ácidos e extremamente arenosos (JACOMINE, 1986).

Outra classe de solos encontrada na planície costeira do estado do Piauí, segundo Jacomine (1986) são os Gleissolos Sálicos, são solos halomórficos, poucos diferenciados, que apresentam acumulação de sais solúveis, tendo um horizonte A pouco espesso e apresentam normalmente crostas superficiais de sais cristalinos no período seco. São solos originados de sedimentos aluviais recentes, em relevo plano de várzeas, o que os assemelha aos solos aluviais. Ainda segundo o mesmo autor, esses solos distribuem-se nas várzeas próximo as desembocaduras dos rios litorâneos e atualmente são bastante aproveitados para fins agrícolas em virtude de sua alta salinidade.

De acordo com relatório da Fundação CEPRO (1996) os Planossolos Nátricos são solos rasos a moderadamente profundos, distribuídos em relevos planos da planície fluviais. São solos que apresentam baixa permeabilidade e fortemente susceptíveis a erosão. São solos com horizonte plânico e caráter sódico imediatamente abaixo de um horizonte A ou E dentro de 200 cm a partir da superfície do solo (SANTOS et al., 2018). Apresentam uma sequência de horizontes subsuperficiais com aspectos associados à umidade em excesso ou drenagem imperfeita, tais como mosqueados ou cores de redução. Apresentam saturação com sódio trocável igual ou maior que 15% no horizonte Bt (plânico) e/ou C, horizonte B com estrutura colunar ou prismática e transição do horizonte A ou E para o horizonte Bt quase sempre abrupta.

Cabral (2018) realizou o mapeamento de solos de reconhecimento de alta intensidade para a área (figura 7). A caracterização das unidades de mapeamento foi descrita juntamente com as unidades litoestratigráficas (figura 5) e foram divididas em:

Depósitos fluvioaluvionares(Qfa):

SNo – Associação complexa de: PLANOSSOLO NÁTRICO Sálico neofluvissólico, textura média e média/argilosa + NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico, textura indiscriminada + CAMBISSOLO FLÚVICO Sódico vertissólico salino, textura indiscriminada + VERTISSOLO HÁPLICO Sódico típico, textura argilosa, todos A moderado, fase relevo plano, não erodida e erodida, fase floresta tropical de várzea com carnaúba e sem carnaúba.

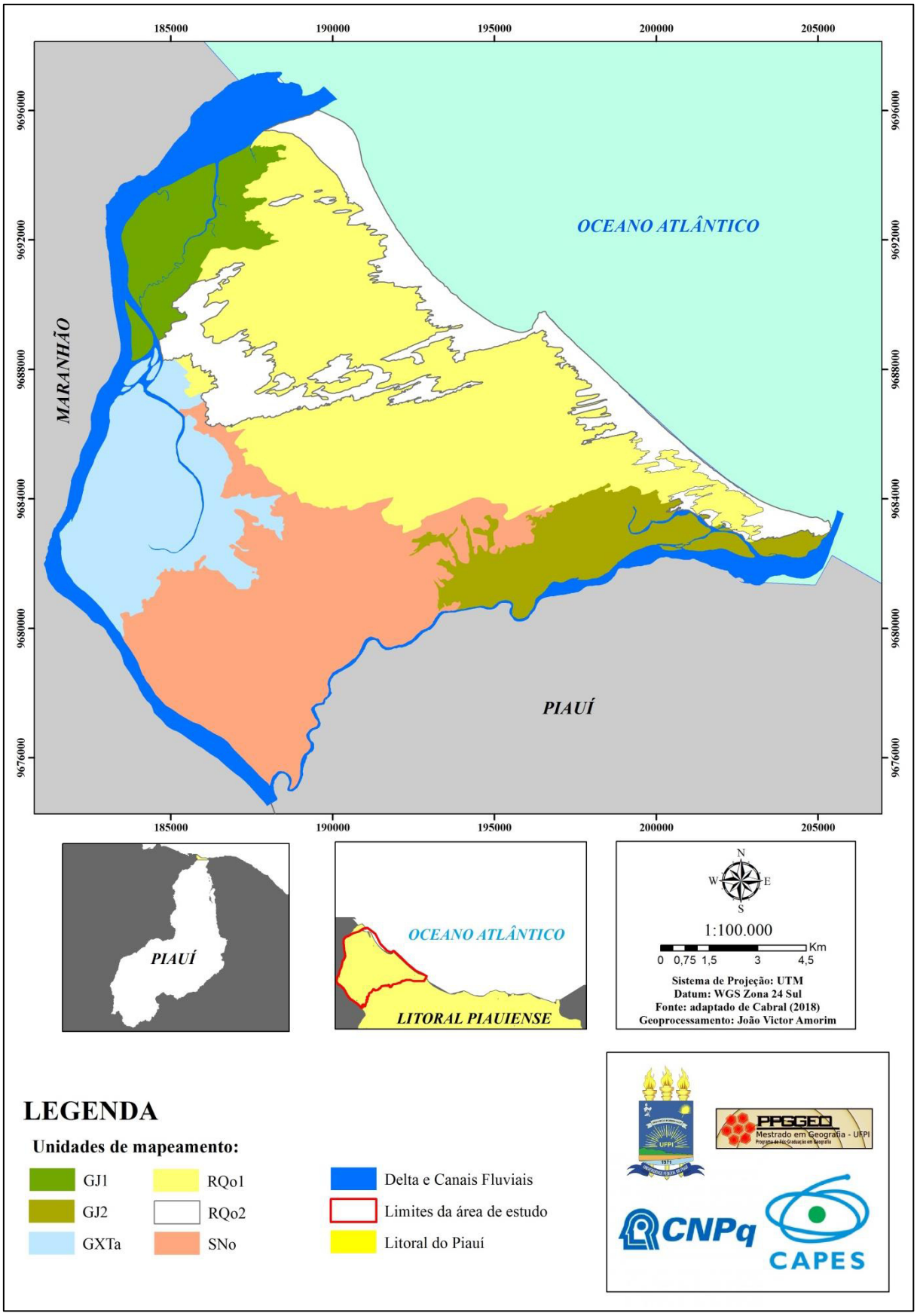


Figura 7 – Mapa Pedológico da Planície do Delta do Parnaíba

Fonte: Cabral (2018), adaptado pelo autor.

GXTa – Complexo de: GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico – GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico neofluvissólico, todos A moderado, textura indiscriminada, fase relevo plano, fase floresta tropical de várzea com carnaúba e sem carnaúba / floresta tropical de várzea com aninga e dendê.

Depósito de pântanos e mangue (Qpm):

GJ1 – Associação de: GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico, textura média e argilosa + GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico neofluvissólico, textura média, ambos A moderado, fase relevo plano, vegetação de mangue.

GJ2 – Associação de: GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico, A moderado + GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvissólico, A fraco e A moderado, textura indiscriminada, fase relevo plano, vegetação de mangue.

Depósitos eólicos litorâneos fixos (Qe):

RQo1 – Associação de: NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico, fase relevo suave ondulado e plano, restinga arbustiva e arbórea + NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico sálico sódico + ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico ârenico sódico + ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico ârenico neofluvissólico sódico, todos A fraco, fase relevo plano, campo hidrófilo de várzea e restinga arbustiva.

RQo2 – Associação de: NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico A fraco, fase vegetação de restinga + Dunas, ambos fase relevo plano e suave ondulado.

3.5 Hidrografia

A composição hidrográfica está representada principalmente pelo rio Igaraçu e pelo rio Parnaíba, que próximo à costa se distribui em vários canais, constituídos por rios, riachos, igarapés, áreas de inundação e lagoas. Devido à baixa energia desses cursos de água há o favorecimento dos processos deposicionais, propiciando a ocorrência de formações sedimentares e meandros abandonados (FROTA; AMORIM; VALLADARES, 2017).

3.5 Vegetação

Com base no Mapeamento da Cobertura das Terras do Delta do Parnaíba realizado através do uso de uma imagem *RapidEye* datada de 2012 com resolução espacial de 5 metros, foi possível identificar 12 (doze) classes de cobertura, sendo: Água – Rios e oceano; Água – Corpos lênticos; Área Urbana; Campos, Dunas e cordão arenoso, Praia, Solo exposto; Vegetação Arbórea Arbustiva; Vegetação Arbustiva Densa; Vegetação de Mangue; Vegetação Paludosa e Vegetação Rasteira, conforme a figura 8 (AMORIM, 2017).

A utilização de técnicas de sensoriamento remoto para análise da cobertura do solo permite o planejamento e administração da ocupação de forma ordenada e racional, monitorar e avaliar áreas de vegetação natural, entre outras. Partindo disso, através do mapa temático e da tabela 3 é possível perceber que grande parte da área de estudo apresenta vegetação do tipo Arbustiva Densa (cerca de 52,20 km²), de forma mais expressiva na porção Centro-Leste, ressaltando-se a ocorrência de espécies do tipo *Machaerium lunatum* (Jiquiriti), *Croton adenocalyx Baill* (Caatinga-branca), *Combretum laxum Jacq.* (Mufumbo), dentre outras (GUZZI, 2012).

Tabela 3 – Área em quilômetros quadrados (km²) e porcentagem das classes de cobertura do Delta do Parnaíba – Piauí

CLASSES DE COBERTURA	ÁREA (km²)	PORCENTAGEM
Água - Rios e oceano	44,34	15,26
Água - Corpos lênticos	7,74	2,66
Área Urbana	2,19	0,75
Campos	44,72	15,39
Dunas e Cordão arenoso	32,59	11,21
Praia	4,76	1,64
Solo exposto	31,85	10,96
Vegetação Arbórea Arbustiva	13,24	4,56
Vegetação Arbustiva Densa	52,20	17,96
Vegetação de Mangue	23,37	8,04
Vegetação Paludosa	16,36	5,63
Vegetação Rasteira	17,25	5,94
TOTAL	290,62	100%

Fonte: Amorim (2017).

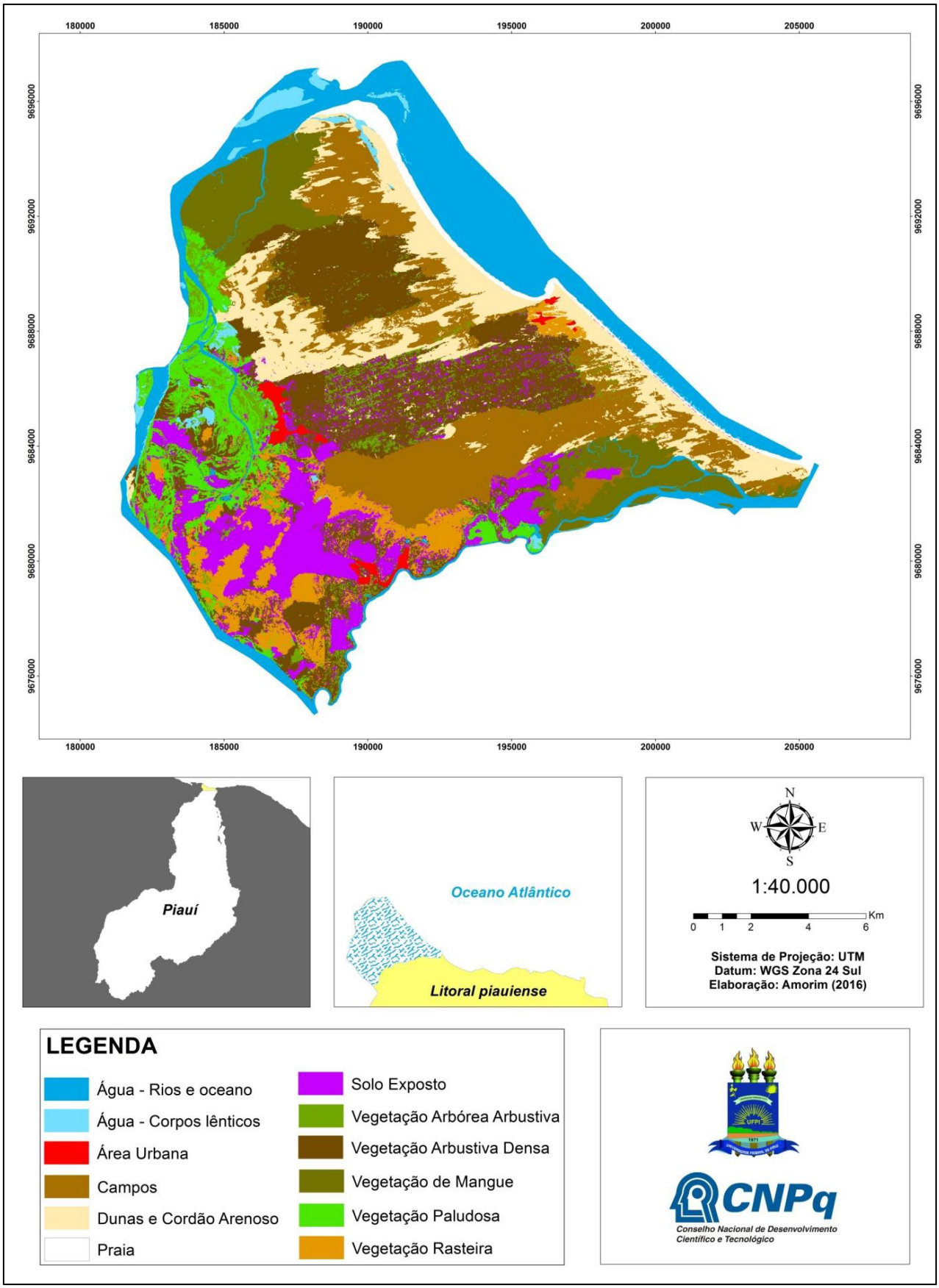


Figura 8 – Mapa de Cobertura das Terras do Delta do Parnaíba – PI

Fonte: Amorim (2017).

As áreas de Vegetação Arbórea Arbustiva, que abrangem 13,24 km², correspondem às áreas com presença de árvores de médio a grande porte, como Cajueiros, por exemplo, além de gramíneas e outras espécies de vegetação herbácea e, ainda, proporções variadas de alguns arbustos, com predominância de vegetação secundária.

As áreas de Mangue correspondem a 8,04% da área (cerca de 23,37 km²). Dentre as espécies encontradas pode-se destacar *Rhizophora mangle* (mangue-vermelho), *Avicennia schaueriana* (mangue negro) e *Laguncularia racemosa,* (mangue-branco) (GUZZI, 2012; SOUSA, 2015).

As áreas onde há o predomínio de Vegetação Paludosa (16,36 km²) compreendem os tipos de vegetação associados a planícies de inundação. As áreas de maior concentração desse tipo de vegetação estão ao longo das bacias hidrográficas do rio Parnaíba, bem como nas superfícies inundáveis de Ilha Grande (FURPA, 1995).

A espécie vegetal de maior ocorrência é a *Euterpe oleracea* (açaí), havendo também ocorrências de *Copernicia prunifera* (carnaúba), *Elaeis guineenses* (dendezeiro), *Laguncularia racemosa, Orbignya phalerata* (babaçu), *Astrocaryum tucumoides* (tucum) e *Mauritia flexosa* (buriti).

A vegetação rasteira, que abrange 17,25 km² (5,94% da área), corresponde às áreas de planície e terraços fluviais onde ocorre o predomínio da atividade de pecuária extensiva, bem como outros tipos de criação, associados a agriculturas de subsistência. As espécies compõem, em diferentes associações florísticas, um extrato gramíneo-herbáceo, com porte de, em média, 40 cm (FURPA, 1995).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão mostrados os materiais, bem como os procedimentos utilizados no trabalho, que tornaram possível o mapeamento dos solos do Delta do Parnaíba. A pesquisa, de cunho quantitativo-qualitativo (LAKATOS; MARCONI, 2003), foi estruturada em quatro grupos de atividades, sendo:

1) Pesquisa documental e levantamento de bibliografias que serviram de base teórica para o desenvolver do trabalho;

2) Trabalho de Campo na área de estudo para validação das teorias científicas, bem como para o conhecimento do local e coleta das amostras de solos, que subsidiaram a etapa três (3) da pesquisa;

3) Análise, em laboratório, dos atributos físicos e químicos dos perfis de solo coletados na etapa anterior, para fins de caracterização e classificação;

4) A última etapa consistiu no Mapeamento Digital de Solos do Delta do Parnaíba, realizado com o auxílio das técnicas de Pedometria e das informações obtidas nas etapas anteriores.

4.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados foram divididos em Softwares/Produtos de Sensoriamento Remoto e materiais de campo. Os *Softwares*/Produtos de Sensoriamento Remoto foram os primeiros a serem utilizados em toda a etapa de elaboração e organização tanto das informações bibliográficas, quanto metodológicas, enquanto que os Equipamentos de Campo foram todas as ferramentas utilizadas nas coletas de solo.

4.1.1 *Softwares* e produtos de Sensoriamento Remoto

Com base nos objetivos pretendidos e para tornar possível o desenvolvimento dos procedimentos metodológicos, os *Softwares* utilizados foram:

a) **ESRI ArcGIS® 10.2** (ESRI, 2013), para edição de arquivos vetoriais, geração de atributos topográficos, álgebra de mapas e criação dos *layouts* dos mapas temáticos;
b) **QGIS versão 2.8.9**, (QGIS, 2015) para visualização, edição e análise de dados georreferenciados;

c) **Weka 3.8** (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*) (FRANK; HALL; WITTEN, 2016), para avaliar a efetividade da predição com os subconjuntos de variáveis selecionadas; e

d) **ADtoSIG** (RUIZ; TEM CATEN; DALMOLIN, 2011), na linguagem Python, para realizar a conversão dos resultados de Árvores de Decisão do Weka para testes condicionais na linguagem do SIG ESRI ArcGIS.

No que diz respeito aos produtos de Sensoriamento Remoto, decidiu-se pela utilização das imagens orbitais dos sensores OLI (*Operational Land Imager*) de resolução espacial de 30 metros, obtida em 14/10/2017, e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) com resolução de 100 metros (reamostradas para 30 metros para coincidir com as bandas espectrais), obtida em 12/09/2017, do satélite *Landsat 8 Collections Land Surface Reflectance On-Demand* com as devidas correções atmosférica e geométrica realizadas, sob o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM) Datum WGS 1984 Zona 24 Sul, e radiometricamente para 16 bits. Tais imagens foram adquiridas na página do Serviço Geológico dos Estados Unidos (*US Geological Survey/USGS)* através do endereço https://earthexplorer.usgs.gov/.

Além destas, foram utilizados Modelos Digitais de Elevação (MDEs) advindos do sensor SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) 1 Arc-Second Global, com resolução de 30 metros e disponibilizados no site da USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/); e mapa temático na escala 1:100.000 de Pedologia da área (CABRAL, 2018).

Vale ressaltar que foram efetuadas correções no MDE nas áreas onde a vegetação apresentou o porte elevado. Essas correções foram realizadas no ArcGIS a partir do método de interpolação Inverso da Distância Ponderada (IDW) (*Spatial Analyst Tools → Interpolation → Inverse Distance Weighted*), tomando como base a carta topográfica SUDENE/DSG (1972) folha Parnaíba (SA 24 Y-A-IV), em escala 1:100.000.

4.1.2 Materiais de Campo

Os materiais utilizados nos trabalhos de campo, para a coleta dos perfis de solo, foram: trado holandês; anel volumétrico; pá reta; enxada e enxadão; martelo; faca; carta de cores Munsell (MUNSELL SOIL-COLOR CHARTS, 2009) e; Sistema de Posicionamento Global (GPS) Garmin Etrex® 10; Além de sacos plásticos, manuais e etiquetas.

4.2 Procedimentos metodológicos

4.2.1 Levantamento de Campo

Os trabalhos de campo se tornam indispensáveis para a validação de teorias científicas. Para haver relevância na comprovação dos fenômenos o Trabalho em Campo deve ser criteriosamente subdividido, a fim de levantar várias informações que deem abrangência ao estudo e sustentem o que é objetivado (LATINI; ARAÚJO, 2009). Para Florenzano (2007) quanto maior é o conhecimento sobre a área de estudo, maior é a quantidade de informação que podemos obter a partir da interpretação de fotografias e imagens dessa área.

Nesse sentido, foram realizadas cinco Inspeções de Campo, entre os dias 10 e 13 de dezembro de 2015, entre 24 e 26 de fevereiro de 2016, entre 19 e 20 de dezembro de 2016, entre 30 de janeiro e 04 de fevereiro de 2017 e entre 09 e 12 de Junho de 2018[2], na qual percorreu-se desde o município de Parnaíba à Ilha Grande, passando pelo Delta, bem como áreas de Mangue (figura 9).

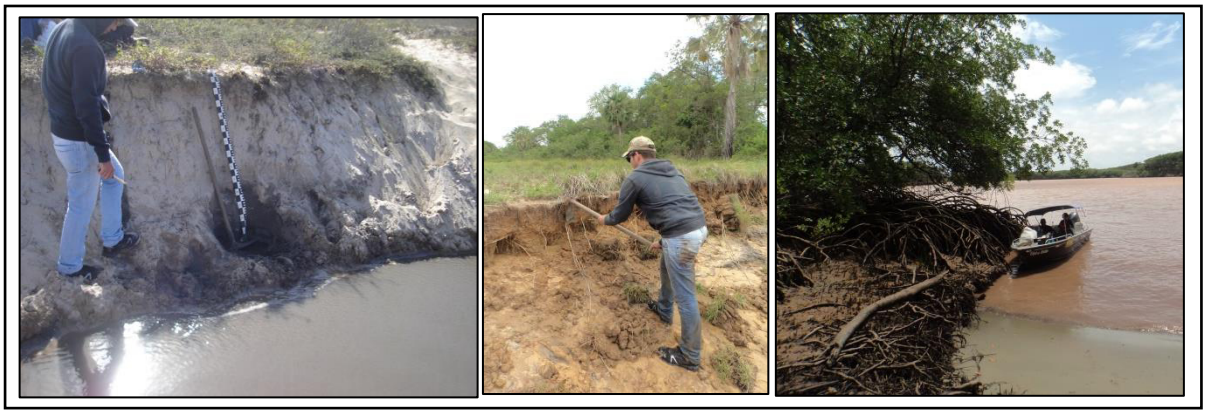


Figura 9 – Coleta de perfil de solo em trabalho de campo no Delta do Parnaíba-PI

Fonte: pesquisa direta.

Uma importante etapa dos levantamentos de solos consiste nos Trabalhos de Campo em que são feitas as observações e a coleta de amostras em pontos específicos, transectos ou áreas previamente estabelecidas. Normalmente é a etapa mais onerosa desse tipo de estudo (CARVALHO JÚNIOR et al., 2014).

[2] Os trabalhos de campo supracitados, realizados entre anos de 2015 e 2016, fizeram parte das atividades pré-estabelecidas no cronograma dos projetos CNPq Universal, intitulado "Paisagem Costeira do Piauí" cadastrado sob o número de protocolo 443176/2014-0; e Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) com plano de trabalho de bolsista intitulado "Uso e cobertura das terras do litoral piauiense" conforme o edital PIBIC e PIBIC nas Ações Afirmativas (Af) /CNPq e UFPI (2015/2016), os quais o discente foi integrante.

Os métodos utilizados em levantamentos pedológicos visam à coleta de dados, descrição de características dos solos no campo e a verificação de limites entre unidades de mapeamento sendo os mais usuais as investigações ao longo de transeções, levantamentos de áreas piloto, estudos de topossequências, sistema de malhas e o método do caminhamento livre (EMBRAPA, 1995), levando em consideração conceitos como intensidade ou tipo do levantamento, variabilidade espacial, escala do mapeamento, objetivos e composição das unidades de mapeamento.

Os campos em questão serviram para conhecimento e observação da área, bem como para obter amostras de solos que pudessem auxiliar no controle dos limites das classes de solos, tanto no mapeamento preexistente para fins de validação, quanto nas classes geradas por pedometria (figura 9). Foram feitos 119 pontos de amostragem, desses, 41 foram amostrados, caracterizados e classificados com base em suas morfologias e análises laboratoriais, os demais classificados de forma expedita no campo, com algumas coletas de amostras extras para verificar condutividade elétrica ou pH.

4.2.2 Classificação dos Solos do Delta do Parnaíba

Para classificação dos solos foram coletados 41 (quarenta e um) perfis ou tradagens de solo. A localização dos pontos de coleta encontra-se ilustrada na figura 10. Desses, 25 (vinte e cinco) tendo sido coletados em sete profundidades por minitrincheira ou trado: 0,00-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,30m; 0,30-0,40m; 0,40-0,60m; 0,60-0,80m e 0,80-1,00m, compreendendo os horizontes diagnósticos superficiais e subsuperficiais, totalizando 175 camadas. Os 16 (dezesseis) perfis restantes tiveram amostras coletadas em seus horizontes diagnósticos. Os solos foram caracterizados segundo o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo de Lemos e Santos (1996) e Santos et al. (2015) e do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos – SiBCS (Santos et al., 2018). As amostras, após a coleta, foram secas e peneiradas (2 mm), constituindo a terra fina seca ao ar (TFSA).

Na TFSA, os atributos físicos e químicos foram determinados de acordo com as orientações do Manual de Métodos de Análise de Solos da EMBRAPA (DONAGEMA et al., 2011), do Boletim Técnico de Métodos de Analise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas (IAC, 2009) e do Manual Técnico de Pedologia do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015).

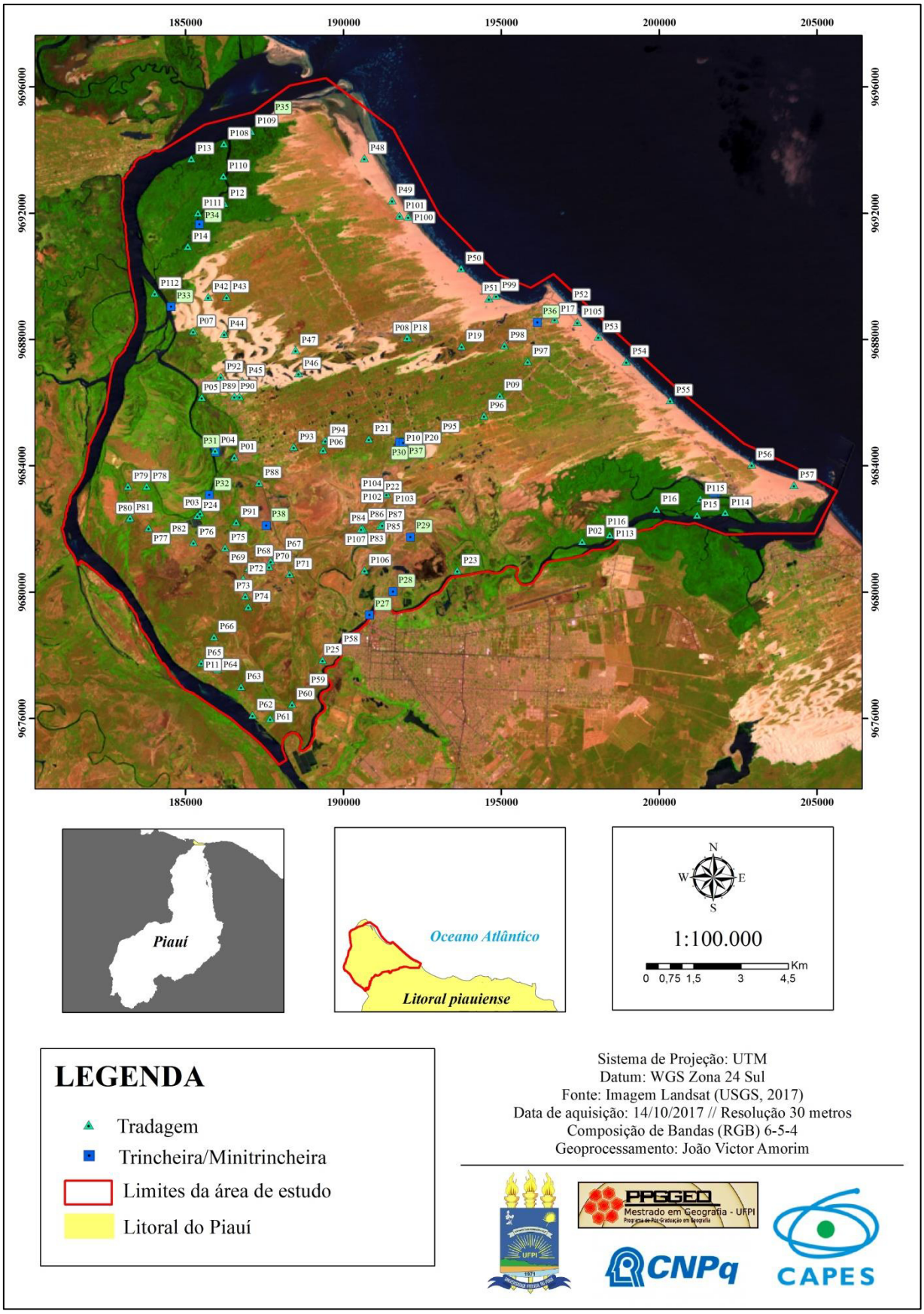


Figura 10 – Localização dos pontos de coleta de amostras de solo

Fonte: elaborado pelo autor.

As análises físicas realizadas consistiram em: densidade aparente (Ds), realizada através do método do anel volumétrico; e análise granulométrica (areia, silte, argila), avaliada pelo método da pipeta, usando-se dispersão com NaOH 1 mol L^{-1}.

No que tange as análises químicas, o pH foi determinado em água; carbono orgânico, por oxidação da matéria orgânica via úmida com $K_2Cr_2O_7$ em meio sulfúrico; Ca^{2+}, Mg^{2+} e Al^{3+} utilizando solução extratora de KCl; Na^+, K^+ e P assimilável pelo método de Mehlich; acidez total (Al^{3+} + H^+); e condutividade elétrica, efetivada por meio do método de condutividade elétrica do extrato aquoso segundo IAC (2009).

Tais análises foram efetivadas no Laboratório de Solos e Sedimentos do Curso de Geografia, localizado no Centro de Ciências Humanas e Letras – CCHL, da Universidade Federal do Piauí, Campus Universitário Ministro Petrônio Portella, Teresina – PI; no Laboratório de Solos do Colégio Técnico de Teresina, UFPI, Campus Ministro Petrônio Portella, Teresina – PI; e no Laboratório de Gênese e Classificação do Solo, localizado no Instituto de Agronomia, da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Campus Seropédica – RJ.

A partir dos atributos morfológicos e dos dados de análises físicas e químicas, os perfis de solo foram classificados de acordo o SiBCS. O resultado da classificação pode ser verificado na tabela 4, que segue:

Tabela 4 – Classificação dos solos do Delta do Parnaíba conforme SiBCS (*continua*)

PERFIL	COORD. X	COORD. Y	CLASSIFICAÇÃO SiBCS (4º nível)
P01	186555	9684276	GLEISSOLO MELÂNICO Sódico neofluvissólico
P02	197570	9681611	GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico sálico
P03	185474	9682510	GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvissólico
P04	185940	9684488	GLEISSOLO SÁLICO Sódico típico
P05	185521	9686162	GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico
P06	189364	9684507	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico
P07	185248	9688262	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico
P08	192068	9688037	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico
P09	194961	9686233	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico
P10	192276	9684546	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico
P11	185996	9678027	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico
P12	186235	9692315	ORGANOSSOLO TIOMÓRFICO Sáprico sálico sódico térrico
P13	185194	9693729	GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico sálico
P14	185077	9690947	GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sálico solódico
P15	201213	9682439	GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico sálico
P16	199926	9682626	GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico sálico
P17	196700	9688647	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico

Tabela 4 – Classificação dos solos do Delta do Parnaíba conforme SiBCS (*conclusão*)

PERFIL	COORD. X	COORD. Y	CLASSIFICAÇÃO SiBCS
P18	192029	9688052	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico típico
P19	193755	9687790	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico
P20	192387	9684560	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico
P21	190814	9684851	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico típico
P22	191150	9683009	CAMBISSOLO FLÚVICO Sódico típico
P23	193617	9680682	CAMBISSOLO FLÚVICO Sálico típico
P24	185382	9682420	GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvissólico
P25	189352	9677850	NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico
P26	185890	9679364	CAMBISSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico
P27	190830	9679298	NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico
P28	191573	9680036	NEOSSOLO FLÚVICO Sódico típico
P29	192129	9681764	PLANOSSOLO NÁTRICO Sálico neofluvissólico
P30	191785	9684766	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico típico
P31	185964	9684455	GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico
P32	185758	9683096	GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico neofluvissólico
P33	184548	9689062	GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico
P34	185446	9691673	GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico
P35	187664	9695022	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico típico
P36	196152	9688562	ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico arênico
P37	191902	9684742	ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico arênico
P38	187558	9682127	VERTISSOLO HÁPLICO Sódico típico
P39	201814	9683170	GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvissólico
P40	201730	9683164	GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvissólico
P41	186764	9680172	CAMBISSOLO FLÚVICO Sódico salino

Fonte: pesquisa direta. Coordenadas em UTM WGS84 fuso 24S.

4.2.3 Mapeamento Digital dos Solos

No MDS existe uma grande quantidade de metodologias que podem ser exploradas em vista do alcance dos objetivos pretendidos (TEN CATEN et al, 2012). Para esta pesquisa, o método de mapeamento digital de solos utilizado foi o de Árvores de decisão (AD), objetivando-se identificar os melhores resultados.

4.2.3.1 Atributos/variáveis preditivas

Com relação aos atributos, foram utilizados os referentes à geomorfometria (atributos topográficos) advindos do Modelo Digital de Elevação da área e os provenientes dos produtos de Sensoriamento Remoto. Em ambiente ArcGIS 10.2, através da ferramenta *Spatial Analyst*

foram geradas as seguintes variáveis: Hipsometria, Declividade, Curvatura (forma do terreno), Direção de Fluxo, Fluxo acumulado e Índice de Umidade Topográfica.

A discretização dos valores hipsométricos levou em conta agrupamentos de curvas de nível nas quais representam a variação da altitude, de acordo com os valores apresentados no histograma. Deste modo, foram selecionadas 5 (cinco) classes que evidenciassem as diferenças altimétricas da área: 0 a 2, 2 a 5, 5 a 10, 10 a 15, 15 a 40 metros.

A declividade foi gerada a partir da ferramenta *ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Surface → Slope*. As classes foram determinadas através do comando *Reclassify* do menu *Reclass*, seguindo o preconizado por (EMBRAPA, 1979), sendo: 0 a 3 % (Plano), 3 a 8 % (Suave Ondulado), 8 a 20 % (Ondulado), 20 a 45 % (Forte Ondulado), 45 a 75 % (Montanhoso), acima de 75% (Escarpado).

A Curvatura (forma do terreno) é resultado da combinação das classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e verticais (côncavo, retilíneo ou convexo) (VALERIANO, 2008) (figura 11).

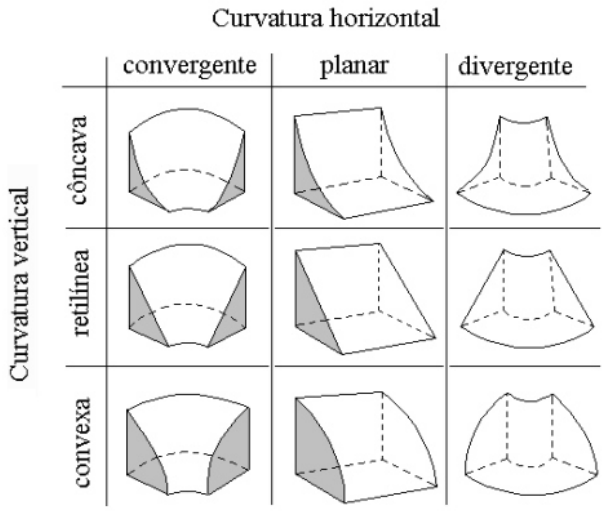


Figura 11 – Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno

Fonte: Valeriano, 2008.

É determinada a partir da função *Curvature* do menu *Surface* do *Spatial Analyst Tools.* Para a discretização da Curvatura no histograma, foram utilizados valores superiores a 0,5 para representar segmentos vertentes côncavos-convergentes, inferior a -0,5 para convexos-divergentes e entre -0,5 a 0,5 segmentos retilíneos-planares.

A Direção de Fluxo (Flow Direction) define as relações hidrológicas entre pontos diferentes dentro de uma bacia hidrográfica. A continuidade topológica para as direções de

fluxo é, consequentemente, necessária para que uma drenagem funcional possa existir. As conexões hidrológicas de direção de fluxo entre dois pontos em uma superfície não são as mesmas que aquelas baseadas em distância Euclidiana (RENNÓ et al, 2008).

A Direção de Fluxo de água na rede de drenagem é obtida pela função *"flow direction"* do menu *Spatial Analyst Tools* → *Hydrology*, que gera uma grade regular definindo as direções de fluxo, tomando-se por base a linha de maior declividade do terreno. A nova grade numérica gerada determina a direção de maior declividade de um "pixel" em relação a seus oito "pixels" vizinhos. Assim, ocorre a descrição numérica da direção que a água irá percorrer após atingir cada "pixel", que pode ser representada graficamente por meio da aplicação do código de direção, conforme a figura 12.

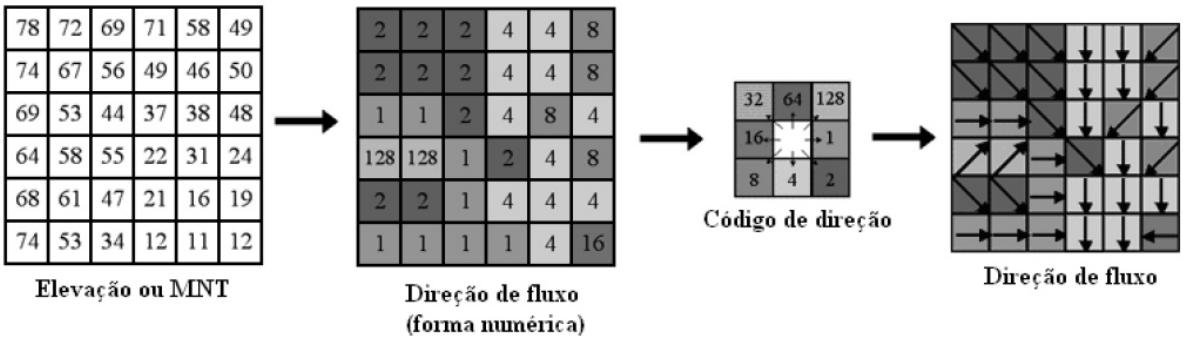


Figura 12 – Exemplo de execução da função "*flow direction*".

Fonte: Sobrinho et al., 2010.

A execução da função *"flow direction"* com o MDE fornece o mapa de direção de fluxo que possibilita a observação da direção do escoamento de água nas vertentes, além da visualização do relevo.

O Fluxo Acumulado (Flow Accumulation) é um parâmetro que indica o grau de confluência do escoamento e pode ser associado ao fator comprimento de rampa aplicado em duas dimensões. O fluxo acumulado, também denominado área de captação, apresenta obtenção complexa, manual ou computacional, uma vez que reúne, além de características do comprimento de rampa (conexão com divisores de água a montante), também a curvatura horizontal (confluência e divergência das linhas de fluxo) (VALERIANO, 2008). A figura 13 exemplifica o fluxo acumulado, sendo possível observar a formação dos caminhos preferenciais de fluxo que originam a rede hidrográfica.

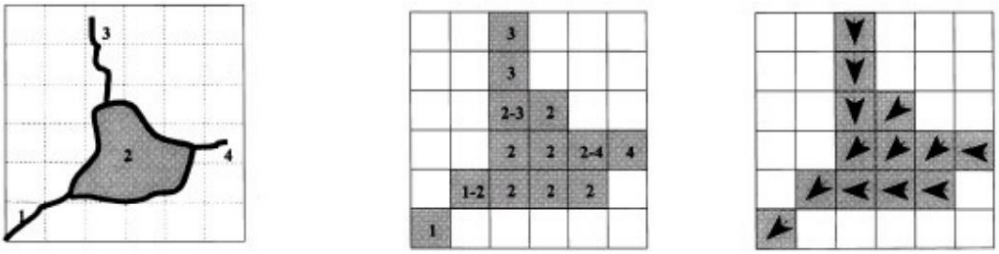


Figura 13 – Exemplo de determinação do fluxo acumulado

Fonte: Sobrinho et al., 2010.

De acordo com Sobrinho et al. (2010), o fluxo acumulado representa a rede hidrográfica, sendo possível montar nova grade contendo os valores de acúmulo de água em cada "pixel". Desse modo, cada "pixel" recebe um valor correspondente ao número de "pixels" que contribuem para que a água chegue até ele. Esse atributo é determinado a partir da função "*flow accumulation*" presente no menu *Spatial Analyst Tools* → *Hydrology*. A partir da direção de fluxo, o fluxo acumulado é obtido somando-se a área das células (quantidade de células) na direção do fluxo (ou escoamento).

O Índice de Umidade Topográfica ou *Topographic Wetness Index* (TWI), de acordo com Sirtoli (2008) é usado para caracterizar a distribuição espacial de zonas de saturação superficial e conteúdo de água nas paisagens. Para Moore et al. (1993) este índice ainda demonstra os efeitos do relevo na localização e extensão das áreas de acumulação de água.

Para Silveira (2010) tem aplicação para a separação dos solos com caráter hidromórfico, que ocorrem em relevo plano, de outras classes de solos que ocorrem em área planas e suave onduladas. É definido como uma função da declividade e da área de contribuição por unidade de largura ortogonal à direção do fluxo (CHAGAS, 2006) obtido através da equação:

$$\mathbf{TWI = \ln (As/\tan\beta)}$$

Onde: *As* é a área de contribuição x tamanho da célula do grid em m^2;

β é a declividade da célula.

No que diz respeito aos atributos provenientes de imagens óticas, foram utilizadas separadamente as bandas 2 (azul), 4 (vermelho) e 6 (infravermelho de ondas curtas) do sensor OLI do satélite Landsat -8, obtida em 14 de outubro de 2017. Como supracitado, as bandas possuem resolução espacial de 30 m e estão sob o sistema de coordenadas UTM *datum* WGS 1984, zona 24S. As bandas utilizadas apresentam correlação com bandas de absorção de

óxidos de ferro e argilominerais (MENESES & MADEIRA NETTO, 2001). A tabela 5 traz as características dos produtos de sensoriamento remoto.

De acordo com Barsi et al., (2014) a banda 2 é utilizada com maior eficácia em mapeamentos batimétricos, distinguindo solo de vegetação e vegetação decídua de vegetação arbórea. A banda 4 discrimina a vegetação através da absorção por clorofila da vegetação verde sadia, sendo útil também para delimitar os limites de classes de solos e tipos de rochas. A banda 6 discrimina o teor de umidade do solo e da vegetação, sendo sensível à turgidez ou quantidade de água nas plantas (JENSEN, 2009).

Tabela 5 – Características espectrais dos instrumentos imageadores OLI e TIRS

Bandas do Landsat-8	Comprimento de onda (micrômetro)	Resolução (metros)
Band 1 – Coastal aerossol	0.43 – 0.45 μm	30
Band 2 – Blue	0.45 – 0.51 μm	30
Band 3 – Green	0.53 – 0.59 μm	30
Band 4 – Red	0.64 – 0.67 μm	30
Band 5 – Near Infrared (NIR)	0.85 – 0.88 μm	30
Band 6 – Shortwave Infrared (SWIR) 1	1.57 – 1.65 μm	30
Band 7 – Shortwave Infrared (SWIR) 2	2.11 – 2.29 μm	30
Band 8 – Panchromatic	0.50 – 0.68 μm	15
Band 9 – Cirrus	1.36 – 1.38 μm	30
Band 10 – Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 – 11.19 μm	100
Band 11 – Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 – 12.51 μm	100

Fonte: Santos, 2013.

Para o MDS, foi empregada também a banda 10 do sensor TIRS do *Landsat 8*, órbita/ponto 219/062, conhecida como banda termal, na faixa do infravermelho, com comprimento de onda de 10,6 a 11,2 μm, sem efetuar nenhuma transformação na imagem. A resolução espacial das bandas do sensor TIRS a bordo do satélite é de 100 metros, mas são reamostradas para 30 metros no produto de dados entregues.

A banda termal mede a quantidade de energia radiante infravermelha emitida das superfícies. A temperatura aparente é uma função da emissividade e da temperatura verdadeira (cinética) da superfície. Ela se faz útil para localizar atividade geotermal, mapeamento de inércia termal para trabalhos geológicos, classificação e análise do estresse da vegetação e para estudos da umidade dos solos (JENSEN, 2009).

Cabe ressaltar que as imagens termais do *Landsat 8* apresentaram anomalias devido a dispersão da luz difusa que chega ao sensor o que ocasionou problemas de calibração nas imagens do satélite (NASA, 2014). De acordo com Schott et al., (2014), estas anomalias incluem diferenças na aparência radiométrica, variações nos índices de calibração cruzadas entre detectores que se sobrepõem em matrizes adjacentes (resultando em formação de faixas) e os erros de polarização na calibração absoluta.

Vários algoritmos foram testados pela USGS, e uma correção inicial foi aplicada nas imagens a partir de fevereiro de 2014, entretanto a USGS ainda não recomenda o uso da banda 11 em virtude das anomalias existentes na mesma, justificando-se assim a opção do uso da banda 10 do sensor TIRS para a presente dissertação.

Foram utilizados, também índices obtidos da relação entre diferentes bandas deste sensor através da divisão entre medidas de reflectância em porções separadas do espectro para aumentar ou revelar informações quando existe uma relação inversa entre duas respostas espectrais para um mesmo alvo. Se duas feições apresentam o mesmo comportamento espectral, estas relações fornecem pouca informação adicional, por outro lado, se elas têm respostas espectrais bastante diferentes, as relações entre dois valores fornecem um único valor que expressa concisamente o contraste entre duas reflectâncias (CAMPBELL, 1987).

Os índices utilizados foram o "*clay minerals*" obtido pela divisão da banda 6 (infravermelho próximo) (1,57 - 1,65 μm) pela banda 7 (infravermelho próximo) (2,11 - 2,29 μm) e o "*iron oxide*" pela divisão da banda 4 (vermelho) (0,64 - 0,67 μm) pela banda 2 (azul) (0,45 - 0,51 μm), originalmente desenvolvidos para o sensor TM do LANDSAT e conforme as equações:

$$\boldsymbol{CLAY} = \frac{\boldsymbol{IVP\ (BAND\ 6)}}{\boldsymbol{IVP\ (BAND\ 7)}} \qquad\qquad \boldsymbol{IRON} = \frac{\boldsymbol{RED}}{\boldsymbol{BLUE}}$$

Os índices "*clay minerals"* e "*iron oxide",* segundo Sabins (1997) são muito empregados no sensoriamento remoto geológico e podem ser utilizados para auxiliar na distinção de solos com características físicas e mineralógicas diferentes. O primeiro para quantificar e enfatizar certas propriedades da superfície do solo, em particular, minerais de argila (caulinita, ilita e esmectita). O segundo aplica-se a minerais de ferro como goethita e hematita que têm baixos valores de reflectância na banda 2 e elevados valores na banda 4, consequentemente, os solos tendem a apresentar elevados valores da relação entre as bandas 4 e 2, que varia de acordo com a composição mineralógica do solo.

Além dos supracitados, também foram utilizados o Índice da Vegetação por Diferença Normalizada – NDVI (*Normalized Difference Vegetation Índex*) e o Índice de Umidade da Diferença Normalizada – NDWI (*Normalized Difference Water Index*).

Para Chagas (2006) os índices de vegetação são formados a partir da combinação de vários valores espectrais que são somados, divididos ou multiplicados de modo a produzir um único valor que indica a quantidade ou vigor da vegetação dentro de um pixel. Nesse sentido, para a imagem do sensor OLI do *Landsat 8*, o índice NDVI foi obtido pela seguinte fórmula:

$$\mathbf{NDVI} = \frac{\mathbf{IVP-R}}{\mathbf{IVP+R}}$$

onde, IVP = infravermelho próximo e R = vermelho.

O NDWI foi concebido com a finalidade de delinear ambientes de águas abertas, automatizando a determinação do limiar entre água e terra (vegetação terrestre e solos), permitindo, segundo McFeetrs (1996) o seguinte: a) maximizar a reflectância típica da água utilizando o comprimento de onda do verde; b) minimizar a baixa reflectância dos corpos de água no infravermelho próximo; e c) realçar o contraste entre a água e a cobertura vegetal, proporcionada pelo infravermelho próximo. O NDWI é obtido através das bandas do verde (G) e do infravermelho próximo (IVP):

$$\mathbf{NDWI} = \frac{\mathbf{G-IVP}}{\mathbf{G+IVP}}$$

Segundo JI et al., (2009), a concepção de um índice espectral de água foi baseada no fato de que a água absorve energia em comprimentos de onda do infravermelho próximo (NIR) e ondas curtas de infravermelho (SWIR).

O valor de NDWI varia de -1 a 1. McFeeters (1996) definiu zero como o limiar, sendo NDWI $\geq$ 0 correspondente a água e NDWI$\leq$ 0 a ausência de água. Nota-se que na equação foram utilizadas as faixas espectrais do verde e infravermelho próximo, diferentemente do índice de diferença normalizada da água proposto por Gao (1996), que emprega na equação as duas bandas na faixa espectrais do infravermelho próximo (0,86 μm e 1,24 μm) (BRENNER; GUASSELLI, 2015).

4.2.3.2 Elaboração e análise das matrizes de dados

A partir dos 119 pontos amostrados em campo, 98 foram utilizados para treinamento dos modelos e 21 restantes para posterior validação dos mapas. As amostras foram estratificadas e sorteadas dentro de cada unidade de mapeamento estabelecida no mapa pedológico convencional (CABRAL, 2018). A divisão foi realizada de forma a manter ambos

os conjuntos bem distribuídos em toda a área de estudo e em proporções representativas de todas as unidades.

Dessa forma, foram determinadas doze (12) matrizes de dados que consistiram em: banda 10 do *Landsat 8* (banda termal), índices espectrais, variáveis geomorfométricas e união de todos os parâmetros, sempre utilizando as mesmas combinações de variáveis preditoras. As matrizes foram elaboradas para o 2º nível categórico e a validação baseada nos solos amostrados no campo. Também foram elaboradas matrizes para o conjunto de unidades de mapeamento do mapa pedológico convencional pré-existente, considerando esse mapa como a base para a validação. E ainda para um conjunto de associações determinado com base nas características da paisagem da área de estudo com íntima correlação com os solos existentes, devido principalmente ao material de origem. Essas matrizes podem ser visualizadas nas tabelas 6, 7 e 8 que seguem.

Tabela 6 – Descrição das matrizes de dados para o 2º nível categórico

Matriz	Variáveis	Nível taxonômico
1	Banda termal (Banda 10)	2º Nível
2	ÍNDICES ESPECTRAIS (Banda 2, Banda 4, Banda 6, Iron Oxide, Clay Minerals, NDVI e NDWI)	2º Nível
3	MORFOMETRIA (Altimetria, Declividade, Curvatura, Direção de Fluxo, Fluxo Acumulado e TWI)	2º Nível
4	Banda termal + ÍNDICES ESPECTRAIS + MORFOMETRIA	2º Nível

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Descrição das matrizes de dados para unidades de mapeamento do mapa tradicional

Matriz	Variáveis	Unidades de Mapeamento
5	Banda termal (Banda 10)	GJ1, GJ2, GXTa, RQo1, RQo2 e SNo
6	ÍNDICES ESPECTRAIS (Banda 2, Banda 4, Banda 6, Iron Oxide, Clay Minerals, NDVI e NDWI)	GJ1, GJ2, GXTa, RQo1, RQo2 e SNo
7	MORFOMETRIA (Altimetria, Declividade, Curvatura, Direção de Fluxo, Fluxo Acumulado e TWI)	GJ1, GJ2, GXTa, RQo1, RQo2 e SNo
8	Banda termal + ÍNDICES ESPECTRAIS + MORFOMETRIA	GJ1, GJ2, GXTa, RQo1, RQo2 e SNo

* Apresentadas no item 3.4.

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Descrição das matrizes de dados para associações da paisagem

Matriz	Variáveis	Associações
9	Banda termal (Banda 10)	H, AR, AL, DM, P
10	ÍNDICES ESPECTRAIS (Banda 2, Banda 4, Banda 6, Iron Oxide, Clay Minerals, NDVI e NDWI)	H, AR, AL, DM, P
11	MORFOMETRIA (Altimetria, Declividade, Curvatura, Direção de Fluxo, Fluxo Acumulado e TWI)	H, AR, AL, DM, P
12	Banda termal + ÍNDICES ESPECTRAIS + MORFOMETRIA	H, AR, AL, DM, P

LEGENDA: H – Solos com caráter hidromórfico de textura argilosa e siltosa, AR – Solos arenosos oriundos de depósitos litorâneos, AL – Solos originados de sedimentos aluviais de textura indiscriminada, DM – Dunas móveis e P – Praia.

Fonte: elaborado pelo autor.

A justificativa pelo estabelecimento das matrizes de dados 1, 5, 9 e 13 com uma variável isolada (banda termal) se dá por conta da mesma apresentar resolução espacial diferente das bandas do *Landsat 8*, uma vez que tal banda provém do sensor TIRS e as demais do OLI. As tabelas 9 e 10 trazem informações acerca do número de observações por classes de solos em 1º e 2º níveis categóricos para a área de estudo.

Tabela 9 – Classes de solo e número de observações por classe no 1º nível categórico para as amostras de treinamento

SIMBOLOGIA	CLASSE DE SOLO	NÚMERO DE AMOSTRAGEM
G	GLEISSOLO	32
RQ	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO*	17
RY	NEOSSOLO FLÚVICO*	14
O	ORGANOSSOLO	1
C	CAMBISSOLO	6
S	PLANOSSOLO	8
E	ESPODOSSOLO	2
V	VERTISSOLO	2
Total	**8**	**82**

* Foram separados até o segundo nível pela falta de semelhança dos mesmos no primeiro nível categórico.

Fonte: elaborado pelo autor.

As amostras restantes que completam o número 98, já supracitado, foram classificadas como Praia – P (10 amostras) e Dunas Móveis – DM (06 amostras). Para evitar que os algoritmos classificadores influenciassem em uma informação incorreta, optou-se por diferenciar NEOSSOLO QUARTZARÊNICO de NEOSSOLO FLÚVICO devido à suas texturas, materiais de origem e locais de ocorrência distintos. Os RQ apresentam textura arenosa em todos os horizontes, com estrutura de grãos simples e maciça. Apresentam o mineral quartzo como predominante, de acordo com as análises de difração de raio-x e são formados a partir de depósitos eólicos litorâneos e de praias. Já os RY são solos minerais pouco evoluídos, formados a partir de depósitos aluviais recentes, com mineralogia composta por argilas silicatadas e textura indiscriminada.

Tabela 10 – Classes de solo e número de observações por classe no 2º nível categórico para as amostras de treinamento

SIMBOLOGIA	CLASSE DE SOLO	NÚMERO DE AMOSTRAGEM
GM	GLEISSOLO MELÂNICO	**1**
GJ	GLEISSOLO TIOMÓRFICO	**14**
GX	GLEISSOLO HÁPLICO	**7**
GS	GLEISSOLO SÁLICO	**10**
RQ	NEOSSOLO QUARTZARÊNICO	**17**
RY	NEOSSOLO FLÚVICO	**14**
OJ	ORGANOSSOLO TIOMÓRFICO	**1**
CY	CAMBISSOLO FLÚVICO	**6**
SN	PLANOSSOLO NÁTRICO	**8**
EK	ESPODOSSOLO HUMILÚVICO	**2**
VX	VERTISSOLO HÁPLICO	**2**
Total	**11**	**82**

Fonte: elaborado pelo autor.

As bases de dados foram exportadas como tabela e convertidas em um arquivo delimitado por vírgula (CSV format – *MS- DOS*) e depois reorganizadas em um formato de arquivo de relação de atributos (ARFF - *Attribute-Relation File Format*) que descreve uma lista de instâncias que compartilham um conjunto de atributos, para posterior uso no software Weka 3.8 (WITTEN & FRANCK, 2005).

No Weka, para análises dos conjuntos de dados, foi verificado o desempenho do algoritmo classificador J48, correspondentes ao método de Árvores de Decisão. O melhor

resultado dentre cada matriz de dados foi escolhido para o mapeamento através da predição das classes de solo pelo algoritmo. Este gera automaticamente uma avaliação de acurácia.

Em todos os procedimentos realizados foi utilizado o método conhecido como "*K-fold Cross-Validation*" como técnica para a estratificação da base dados em conjunto de treinamento e teste (DIAS, 2015). Para Witten, Frank e Hall (2011), essa técnica tem se tornado um padrão para aplicações que utilizam métodos de mineração de dados. Ainda, segundo estudos avaliados pelos mesmos autores, sugere-se a adoção do número 10 (dez) como valor padrão para o número de partições dos dados (K).

4.2.3.3 Método de Árvores de Decisão

Os estudos que empregam a técnica de mineração de dados por Árvore de Decisão (AD) têm como objetivo utilizar uma abordagem quantitativa a qual relaciona os fatores de formação e classes de solos de forma similar ao raciocínio do pedólogo (CRIVELENTI et al., 2009; GIASSON et al., 2011). O emprego de AD é fruto de pesquisas que buscam aplicar técnicas robustas para a extração de padrões em grandes conjuntos de dados (WITTEN; FRANK, 2005).

A abordagem por AD tem sido empregada por apresentar a vantagem de possibilitar a expressão das relações solo-paisagem de maneira explícita, o agrupamento e a busca por padrões, além de possibilitar o entendimento de como esses dados são interrelacionados (KHEIR et al., 2010).

A árvore é composta basicamente por três componentes: a) raiz ou ponto de partida; b) o nó, conexão entre a raiz, os nós subsequentes e as folhas da árvore; e c) a folha, que representa uma classe homogênea.

A árvore então aplica sucessivamente uma série de regras de decisão para enquadrar os dados, partindo sempre de um conjunto de dados (a raiz). Cada decisão divide os dados em duas novas classes homogêneas, e cada nova classe pode ser novamente dividida em duas ou mais classes com base em outra regra. Cada uma dessas divisões baseada em uma regra é o que se chama de nó, podendo ser criados tantos nós quantos forem necessários para contemplar todas as classes finais. A classe final é representada pela folha, da mesma forma que ocorre em uma árvore real, algumas classes ou folhas podem ser geradas por um número de divisões ou nós diferentes das outras (MILLER; FRANKLIN, 2001)

A figura 14 representa uma árvore de decisão onde cada nó de decisão contém um teste para algum atributo, cada ramo descendente corresponde a um possível valor deste

atributo, cada folha está associada a uma classe e, cada percurso da árvore, da raiz à folha, corresponde a uma regra de classificação.

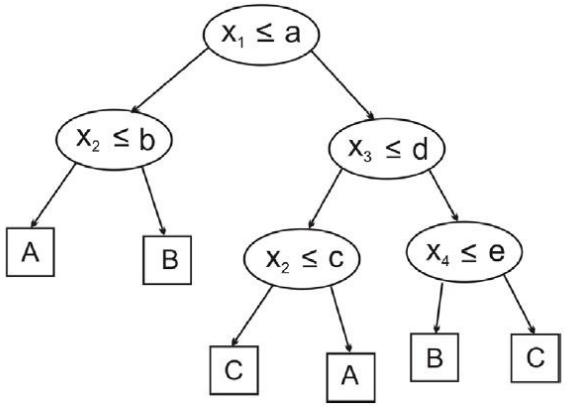


Figura 14 – Esquema de uma árvore de decisão com quatro variáveis (x1, x2, x3 e x4) e três classes (A, B e C)
Fonte: ZHOU et al., 2004.

Para esta dissertação, como supracitado, o algoritmo de AD utilizado foi o J48, este gera árvores a partir de um conjunto de dados de treinamento e a cada nó, o algoritmo escolhe um atributo que melhor subdivide o conjunto das amostras em subconjuntos homogêneos e caracterizados por sua classe. O J48 utiliza o ganho de informação na escolha do atributo para subdivisão (HALL et al., 2009).

4.2.4 Geração dos mapas pedológicos digitais

A partir dos procedimentos descritos, para cada matriz de dados foi eleita e aplicada a melhor modelagem de classificação. No entanto, o mapa pedológico digital foi gerado apenas para aquelas que apresentaram os melhores resultados.

O resultado da matriz de dados com melhor desempenho na classificação foi exportado para arquivo de texto (.txt) e processado no software de conversão ADtoSIG (RUIZ; TEM CATEN; DALMOLIN, 2011). Este converte o arquivo para uma base possível de ser interpretada no ArcGIS 10.2. O arquivo de saída do ADtoSIG foi utilizado na ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS. O mapa foi produzido a partir das regras condicionais estabelecidas pelo programa e dos arquivos em formado *raster* das variáveis preditivas. Nesse caso, a escolha de qual atributo utilizar foi feita no próprio programa Weka durante a classificação.

4.2.5 Avaliação e acurácia do mapeamento pedométrico

O mapeamento pedométrico é geralmente caracterizado como uma produção geoestatística quantitativa da geoinformação do solo. Este usualmente é concluído com a produção de um mapa no formato matricial e uma medida da incerteza deste mapa (NEUMANN, 2012).

A avaliação da acurácia dos mapas gerados por Pedometria para a área de estudo foi realizada a partir da validação através dos 21 pontos classificados em campo e da comparação entre os mapas gerados com o mapa pedológico convencional pré-existente (CABRAL, 2018). Esses dados foram confrontados com os mapas preditos por meio de Matrizes de Erro e a partir dos resultados foram calculadas as seguintes medidas de acurácia: Índice *Kappa*, Exatidão Global e Exatidão do ponto de vista do Usuário e Produtor.

Para Moreira et al. (2009) a Matriz de Erros ou de Confusão identifica o erro global da classificação para cada grupo, mostrando também como se deram as confusões entre os mesmos. Segundo Centeno (2003), é uma forma de representar as contradições entre a verdade de campo e o resultado do processo de classificação.

Neste tipo de registro os dados de referência geralmente são representados pelas colunas da matriz e são comparados com os dados classificados, representados pelas linhas onde os elementos da diagonal principal indicam o nível de concordância entre os dois conjuntos de dados ou a acurácia global (SILVA, 2012). A partir das demais células, é possível calcular os dois tipos de erros associados ao sistema de classificação: os erros de inclusão, por vezes também chamado de exatidão do usuário e os erros de omissão ou exatidão do produtor.

Os erros de inclusão são calculados ao longo das linhas e quantificam os casos nos quais outras classes foram atribuídas a uma classe particular na predição e são obtidos dividindo-se a soma dos casos fora da diagonal principal na linha pelo total da linha. Os erros de omissão são calculados ao longo das colunas e quantificam os casos pertencentes a uma determinada classe no mapa original e foram atribuídos a outras classes na predição e são obtidos dividindo-se a soma dos casos fora da diagonal principal na coluna pelo total da coluna (DIAS, 2015).

Vale ressaltar que as matrizes de erro e medidas individuais como os erros de inclusão e de omissão não consideram casos em que as concordâncias entre o mapa estimado e o mapa convencional de solos usado como referência podem ocorrer puramente devido ao acaso (CONGALTON, 1991; PONTIUS, 2000). Para compensar as concordâncias devido ao acaso,

a estatística mais frequentemente empregada é o índice *Kappa* (COHEN, 1960), uma técnica multivariada discreta usada para mensurar a concordância entre categorias estimadas e categorias de referência.

O cálculo do índice *Kappa* leva em conta o número total de acertos, os erros de omissão e os erros de inclusão e é efetuado conforme a equação abaixo (ELNAGGAR, 2007):

$$K = \frac{N\sum_{i=1}^{r} x_{ii} - \sum_{i=1}^{r}\left(x_{i+} * x_{+i}\right)}{N^2 - \sum_{i=1}^{r}\left(x_{i+} * x_{+i}\right)}$$

Onde: *K* é o índice *Kappa*; *N* é o número total de posições na matriz de erro; *r* é o número de linhas na matriz; *xii* são as entradas diagonais da matriz; *xi+* e *x+i* indicam a soma da linha *i* e a soma da coluna *i* da matriz, respectivamente.

Dessa maneira, o índice *Kappa* expressa o grau de concordância entre os dados estimados e os dados de referência, após a concordância devido ao acaso ter sido eliminada. Em avaliações de mapeamentos, o índice *Kappa* geralmente varia de 0 a 1, sendo que zero (0) indica ausência de concordância, ou seja, a estimativa e a referência são estatisticamente independentes e um (1) indica total concordância.

Para classificação de imagens, de acordo com critérios qualitativos expressos em Landis e Koch (1977) a qualidade do índice Kappa pode ser classificada da seguinte forma (tabela 11):

Tabela 11 – Qualidade de classificação segundo o índice Kappa

Coeficiente Kappa	Qualidade da Imagem
Inferior a 0,00	Péssima
0,01 – 0,20	Ruim
0,21 – 0,40	Razoável
0,41 – 0,60	Boa
0,61 – 0,80	Muito boa
0,81 – 1,00	Excelente

Fonte: Landis e Koch (1977).

A Exatidão Global (SILVEIRA, 2010) ou Qualidade Global (CENTENO, 2003) é definida computando o número de pixels corretamente classificados, conforme equação a seguir:

$$\mathbf{EG} = \frac{\boldsymbol{nc}}{\boldsymbol{nt}}$$

Onde:

EG = Exatidão Global; nc = número de pixels corretamente classificados; nt = número de pixels total da matriz.

Por meio deste método é possível verificar o percentual de concordância (C%) e o de discordância (D%), na qual serve como um parâmetro geral de avaliação entre os mapas (SILVEIRA, 2010). A Exatidão Global é considerada um parâmetro geral, pois não permite gerar maiores conclusões, como por exemplo, determinar qual Grupo de Associações de Solo foi mais bem classificado ou quais Grupos encontram-se associados a uma superestimação e são responsáveis pela maior parcela de erros.

Além destas, uma validação a partir do mapa pedológico de Cabral (2018) foi efetivada. Para tal, os produtos do mapeamento digital foram convertidos do formato matricial para camadas vetoriais através do menu *ArcToolbox* → *Conversion Tools* → *Raster to Polygon* do ArcGIS 10.2. Depois de transformados em arquivos *shapefile* (.shp), cada mapa digital foi agrupado com o arquivo do mapa pré-existente através da função *Intersect* presente no menu *Analysis Tools* → *Overlay*. A área dos produtos foi calculada, onde foi possível verificar o percentual de concordância entre cada classe predita com as classes do mapa tradicional. Vale ressaltar que para alguns mapeamentos houve a necessidade de se compatibilizar as legendas de forma a comparar os resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Variáveis derivadas do MDE

A partir do Modelo Digital de Elevação SRTM corrigido com resolução espacial de 30 metros, foram gerados mapas de seis atributos geomorfométricos para o Delta do Parnaíba: altitude, declividade, curvatura, direção de fluxo, fluxo acumulado e índice de umidade topográfica.

Com relação à hipsometria, a área de estudo apresenta, em geral, baixa altitude, com uma média de 2,5 metros. As faixas de altitude predominantes são a de 0 a 2 e 2 a 5 metros, estando distribuídas por toda a área. As faixas de 10 a 15 e maior que 15 metros são as menos expressivas, estando limitadas às áreas de dunas móveis, conforme as figuras 15 e 16(a).

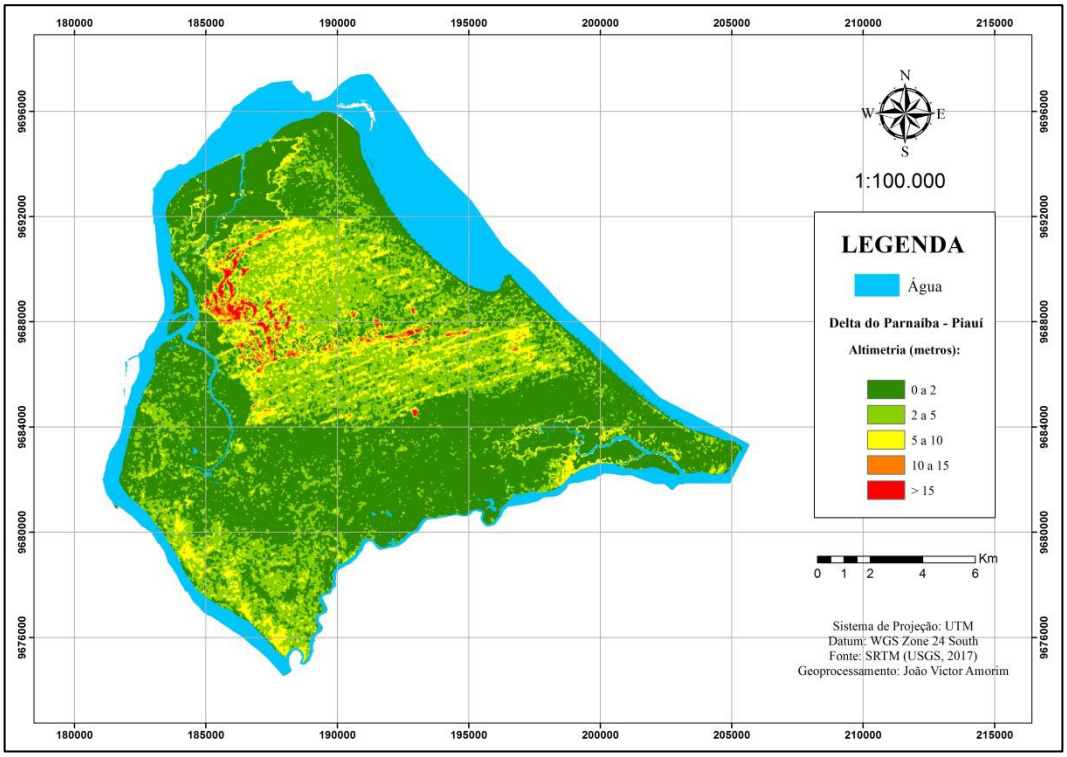


Figura 15 – Classes de altimetria do Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: SRTM (USGS, 2017), adaptado pelo autor.

Com relação à declividade cerca de 153 km² (63,5%) da área possui relevo plano. Os locais de ondulação pouco mais expressiva, de relevo suave ondulado, representam 32,2% e abrangem uma área de 77,75 km². As áreas de maior ondulação, identificadas como onduladas

(4%), forte onduladas (0,2%) e montanhosas (0,03%) concentram-se na região dos campos de dunas móveis, conforme as figuras 17 e 16b.

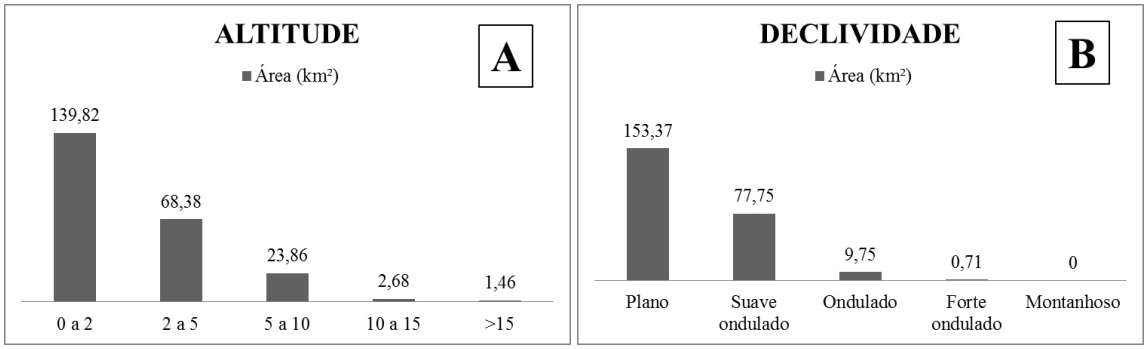


Figura 16 – Frequência das variáveis geomorfométricas por classes de (A) altimetria e (B) declividade

Fonte: elaborado pelo autor.

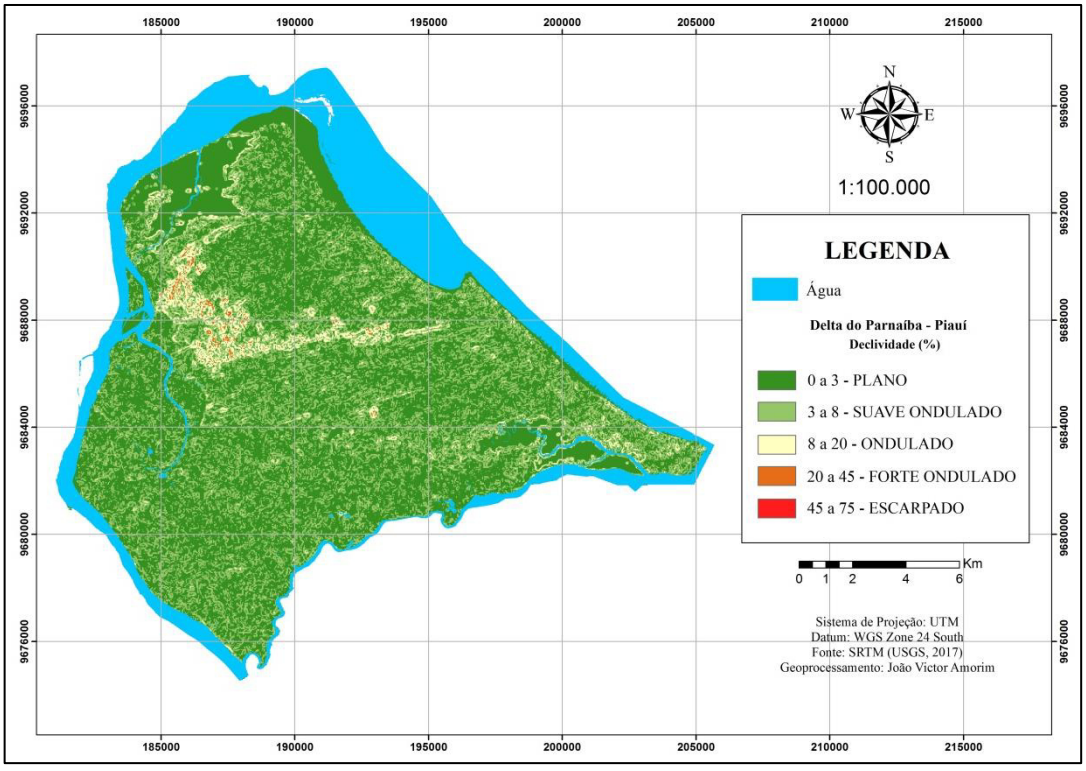


Figura 17 – Classes de declividade do Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: SRTM (USGS, 2017), adaptado pelo autor.

No que diz respeito à curvatura (forma do terreno), ao observar as figuras 18 e 19a observa-se que há uma predominância de segmentos retilíneo-planares, correspondendo a

94,74% da área. As áreas convexo-divergentes e côncavo-convergentes somadas correspondem a apenas 5,26%, apresentando-se nas faixas de dunas móveis.

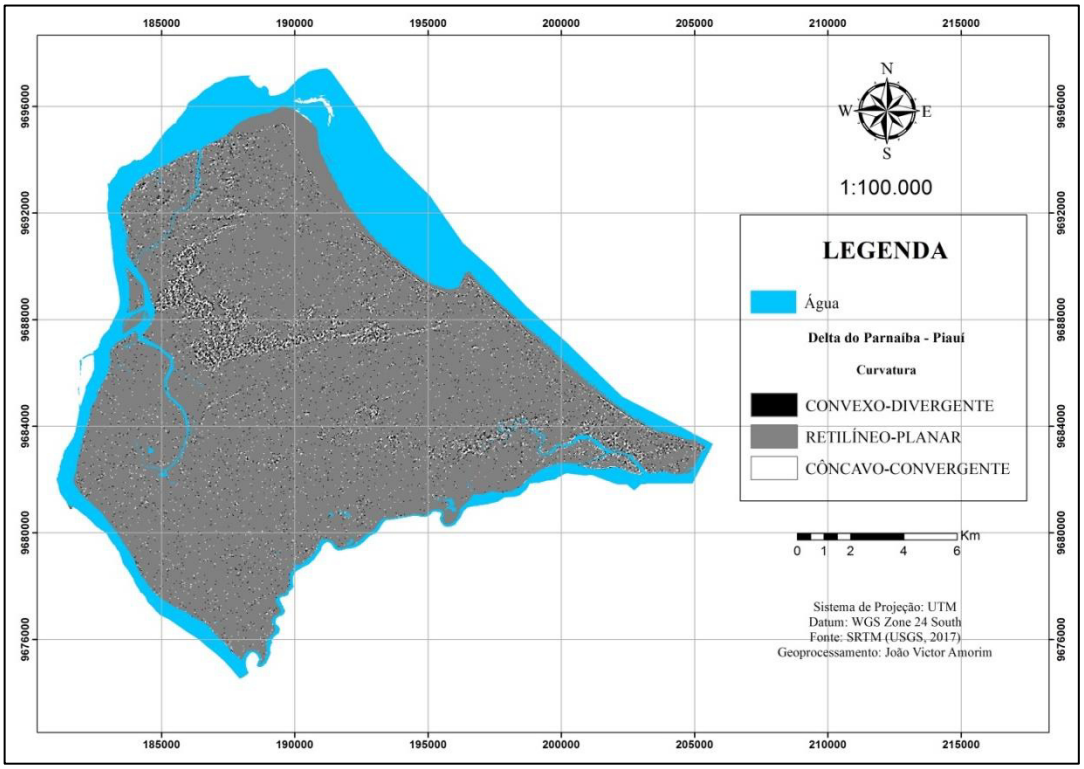


Figura 18 – Classes de curvatura (forma do terreno) do Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: SRTM (USGS, 2017), adaptado pelo autor.

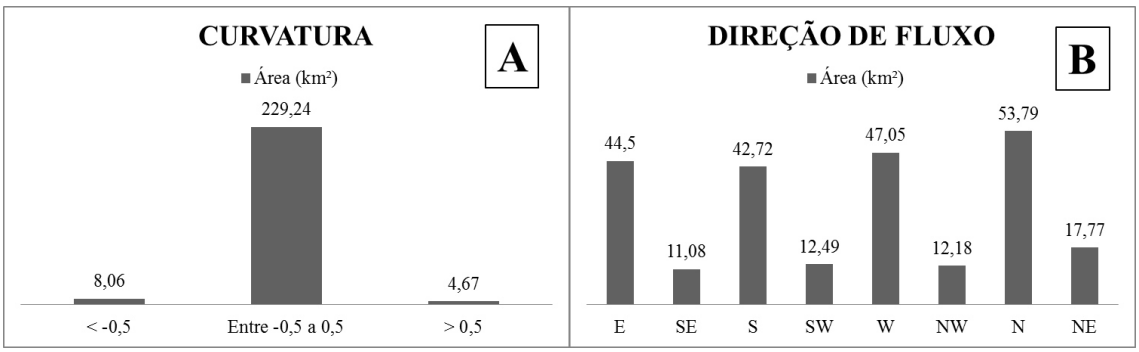


Figura 19 – Frequência das variáveis geomorfométricas por classes de (A) curvatura e (B) direção de fluxo

Fonte: elaborado pelo autor.

A variável direção de fluxo mostra um predomínio das classes Norte (22,26%) e Oeste (19,47%) justificado pelo fato da área estar situada no baixo curso do rio Parnaíba, desembocadura com o Oceano Atlântico, nível de base geral. Por outro lado as classes que

ocupam menor área são Sudeste (4,58%), Noroeste (5,04%) e Sudoeste com 5,17%. As diferenças entre as maiores e as menores classes de direção de fluxo são bastante expressivas (Figuras 19b e 20).

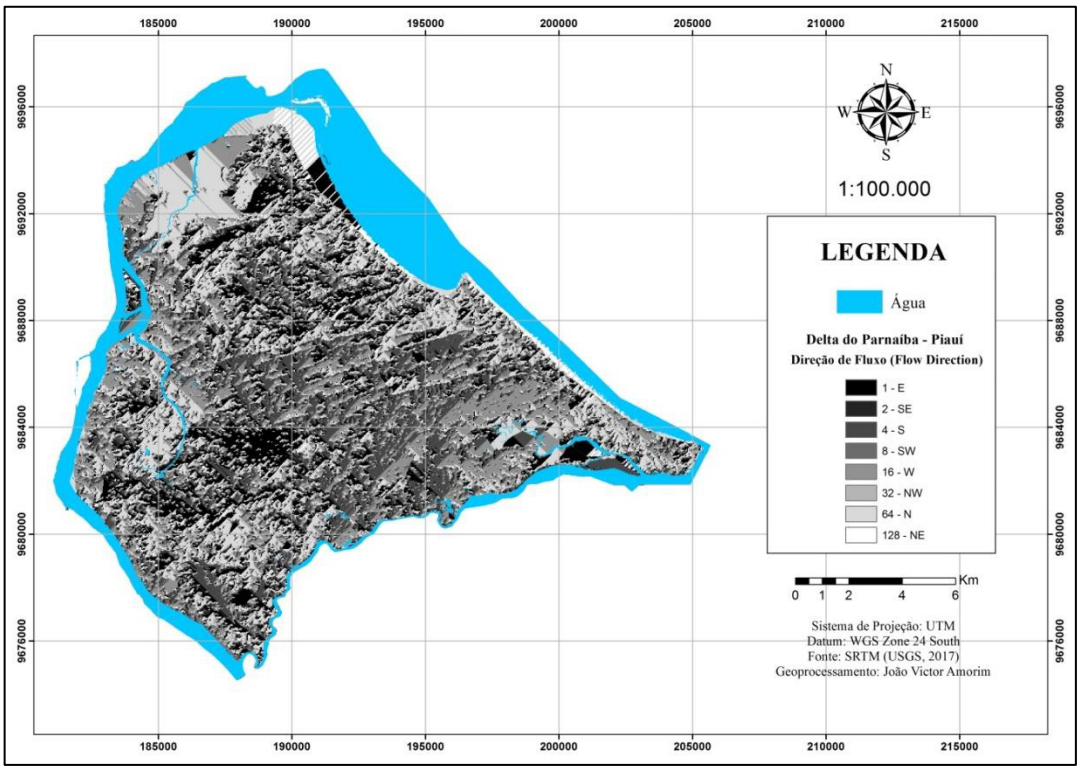


Figura 20 – Direção de fluxo no Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: SRTM (USGS, 2017), adaptado pelo autor.

No que concerne ao fluxo acumulado, locais com células de valores altos indicam maior concentração de fluxo acumulado e, por isso, são consideradas áreas com alta viabilidade para ocorrência de drenagens. Por outro lado, células com valores baixos indicam ausência de fluxo acumulado e, por isso, são consideradas áreas com maior viabilidade para ocorrência de nascentes.

No Delta do Parnaíba, os valores mais altos são encontrados em áreas de ocorrência de solos hidromórficos e de caráter flúvico, formados sob forte influência de sedimentos de natureza aluvionar ou colúvio-aluvionar. A figura 21 ilustra o fluxo acumulado para a área de estudo.

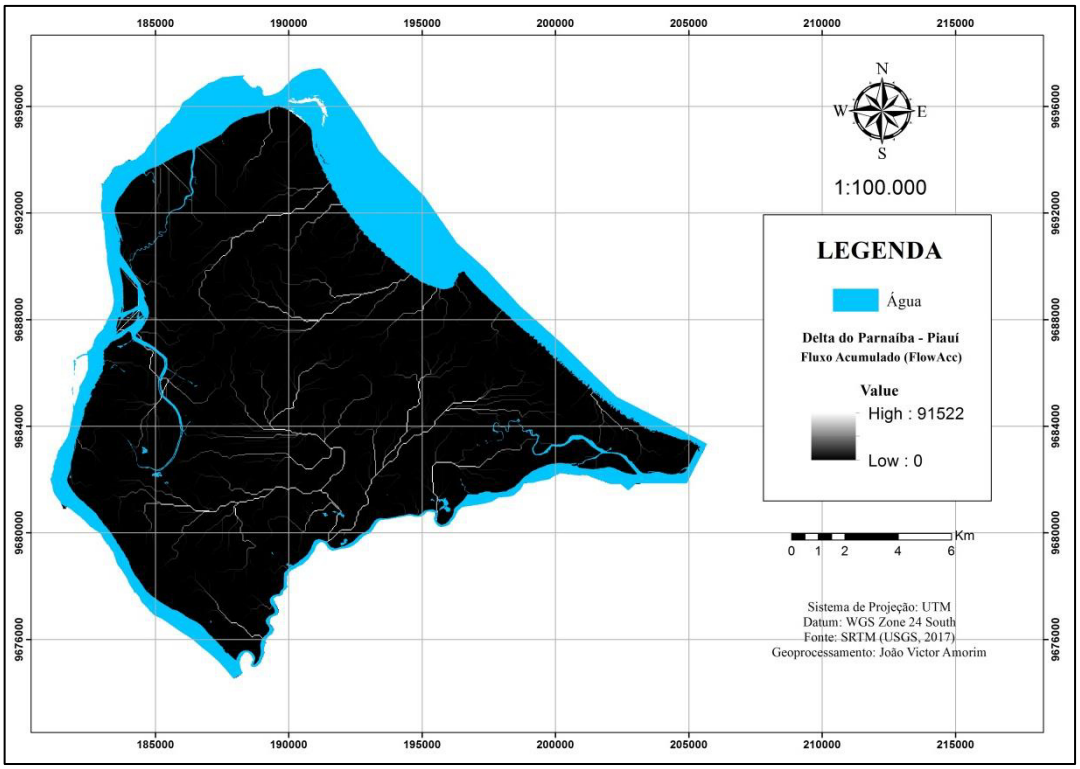


Figura 21 – Fluxo acumulado no Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: SRTM (USGS, 2017), adaptado pelo autor.

O material do delta apresenta uma natureza muito permeável e devido ao nível do lençol freático estar próximo à superfície, a ocorrência de córregos superficiais é quase inviabilizada, resultando em escoamentos subsuperficiais. Ao observar a imagem da figura 3 (item 3) nota-se a presença de zonas de saturação e algumas drenagens nas proximidades dos rios Parnaíba e Igaraçu, essencialmente próximo as áreas de mangue.

A imagem de satélite da figura 3 corresponde ao período de estiagem na região (outubro), porém, nos períodos chuvosos a infiltração de água é bastante favorecida e as camadas superficiais do solo tendem a sofrer uma elevada saturação. Enquanto a frente de molhamento estende-se em direção às camadas mais profundas ou de menos permeabilidade do solo, a direção do fluxo da água na camada saturada do solo superficial é desviada ao longo da (baixa) declividade do terreno, resultando no escoamento subsuperficial e aparecimento de outros trechos de drenagem. Na folha topográfica DSG Parnaíba é possível verificar alguns canais identificados na área. A figura 22 ilustra a imagem de satélite com os arquivos vetoriais da carta DSG representativos da drenagem sobrepostos.

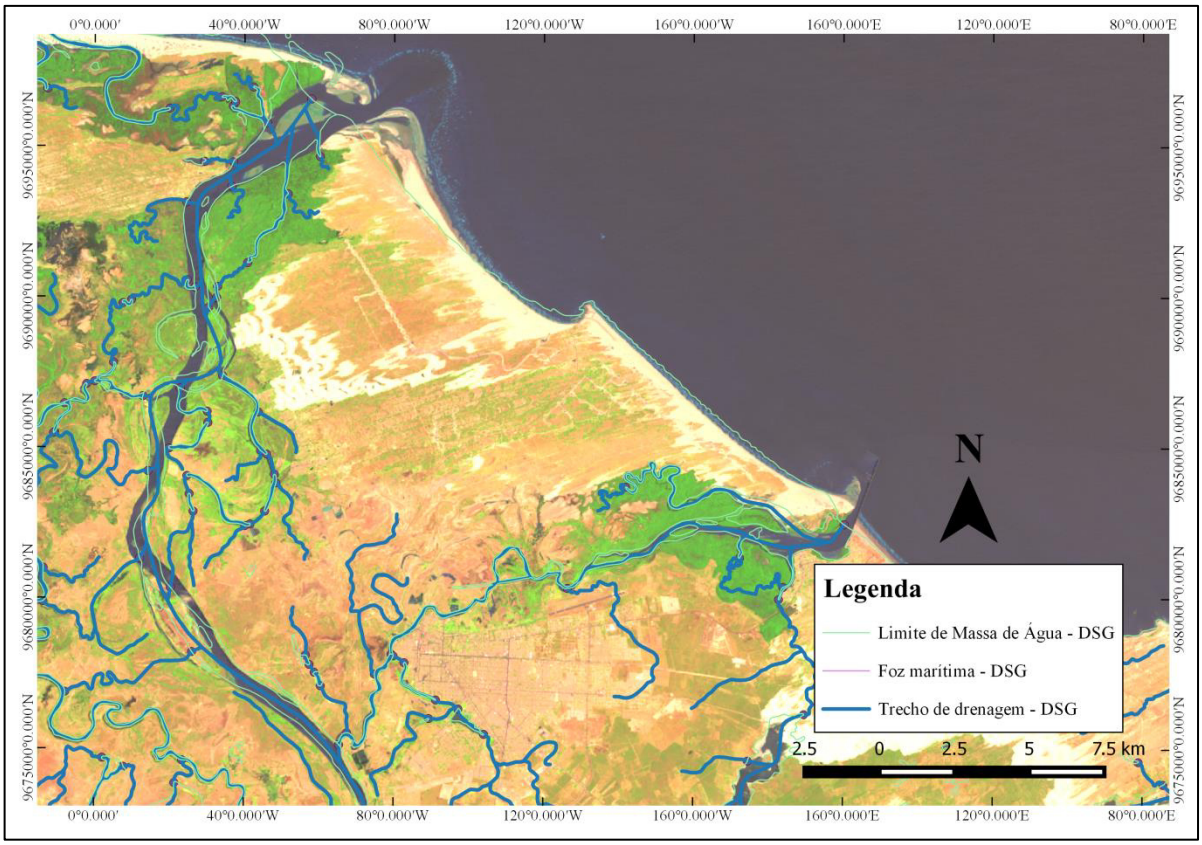


Figura 22 – Drenagem do Delta do Parnaíba

Fonte: USGS (2017); DSG/SUDENE (1972), adaptado pelo autor.

O índice de umidade topográfica (TWI) apresenta potencial para separação de unidades de solos que se encontram em relevo aplainado, ou em baixadas com possibilidade de acumulação de umidade. Na área de estudo, o TWI apresentou valores elevados para áreas mais saturadas (áreas de baixada que acompanham a planície dos rios ou áreas que favorecem o acúmulo de água no solo) e menores para áreas bem drenadas e de declividades superiores a 8% (campos de dunas móveis), com uma variação de -1,5 a 13,9. A figura 23 ilustra o índice gerado para a área.

Vale ressaltar que a equação para obtenção do TWI é Ln (a / tan(B)) onde a é a área de captação 'específica' (ou seja, a área de influxo de subida normalizada para uma medida de comprimento de contorno/fluxo acumulado) e B é o gradiente da inclinação, em radianos, na célula da grade (declividade). O TWI apresentará valores negativos quando a área de captação for menor que tan(B), uma vez que o logaritmo natural de qualquer valor menor do que 1, será negativo. Para o Delta do Parnaíba, o fluxo acumulado e a declividade apresentaram valores zero para grande parte da área, justificando a variação dos valores obtidos para o TWI.

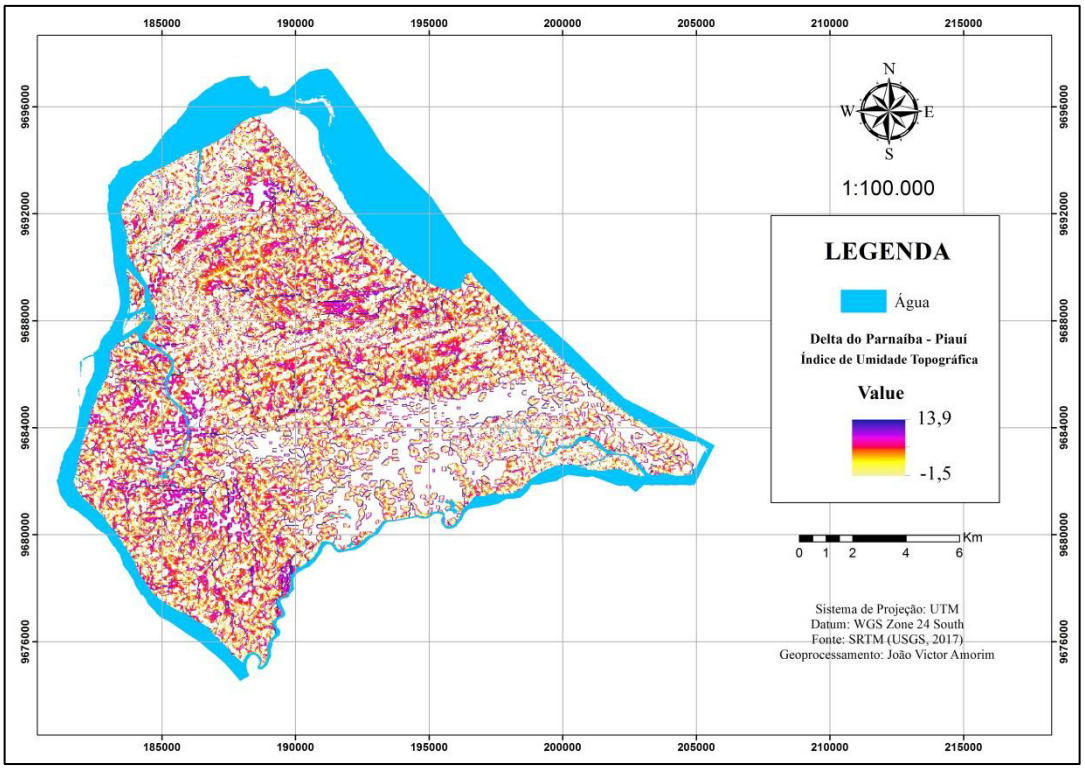


Figura 23 – Índice de umidade topográfica no Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: SRTM (USGS, 2017), adaptado pelo autor.

A seguir serão ilustrados os resultados dos parâmetros preditivos obtidos a partir da imagem *Landsat 8.*

5.2 Variáveis derivadas da imagem Landsat 8

A partir da imagem do sensor OLI do *Landsat 8*, foi possível gerar as seguintes variáveis preditivas: banda 2 – azul, banda 4 – vermelho, banda 6 – infravermelho médio, banda 10 – banda termal do sensor TIRS, "*clay minerals*", "*iron oxide*", NDVI e NDWI.

A banda 2 possui maior penetração em corpos d'água assim como fornece suporte para análises de uso da terra, solo e características da vegetação. Para a área de estudo, essa banda apresentou altos valores de reflectância na faixa de dunas móveis (valores digitais entre 1.590 a 3.411) e nas áreas de cordão arenoso e praia (valores digitais entre 1.030 a 1.590), auxiliando na identificação de solos de textura arenosa e solos de caráter hidromórfico (representados pelos baixos valores dos números digitais) (Figuras 24 e 25).

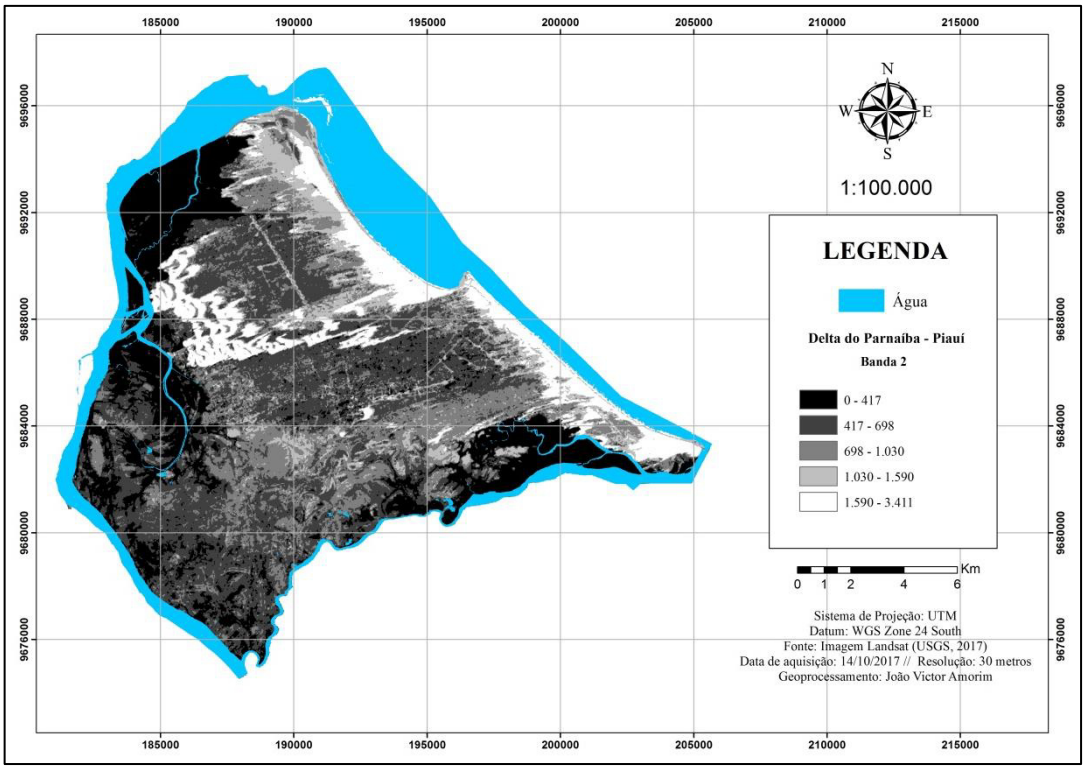


Figura 24 – Banda 2 (*Blue*) do Landsat 8 do Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: USGS (2017), adaptado pelo autor.

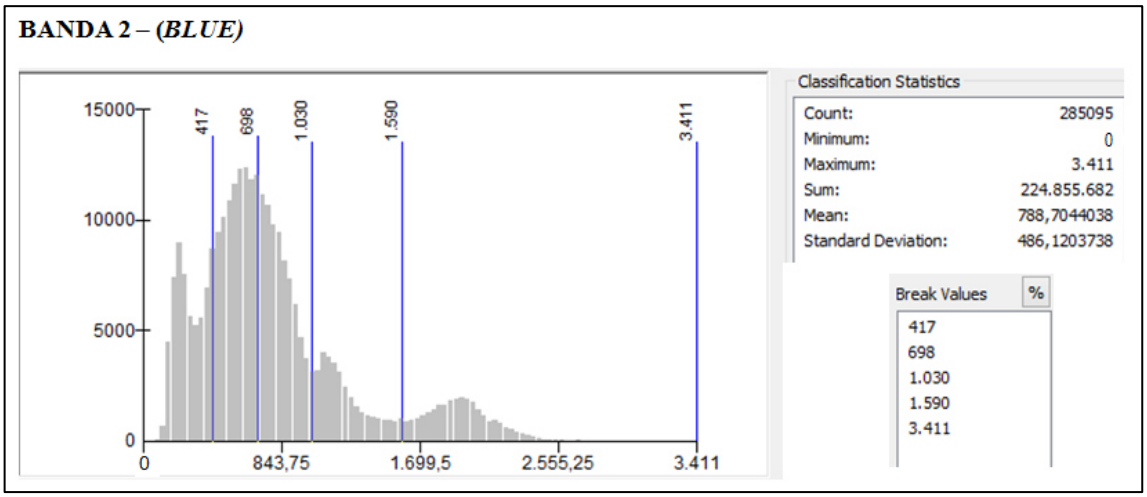


Figura 25 – Histograma e discretização das classes da banda 2

Fonte: elaborado pelo autor.

Para a banda 4 (Figura 26), os valores de digitais ficaram entre 154 e 4867, sendo útil para discriminação da vegetação, pois é a banda vermelha de absorção por clorofila. Assim como a banda 2, a banda 4 apresentou altos valores de reflectância para áreas de solos arenosos e em locais onde a vegetação possui porte denso, como florestas de mangue e áreas

de vegetação paludosa, houve maior absorbância na faixa espectral do vermelho (figuras 26 e 27).

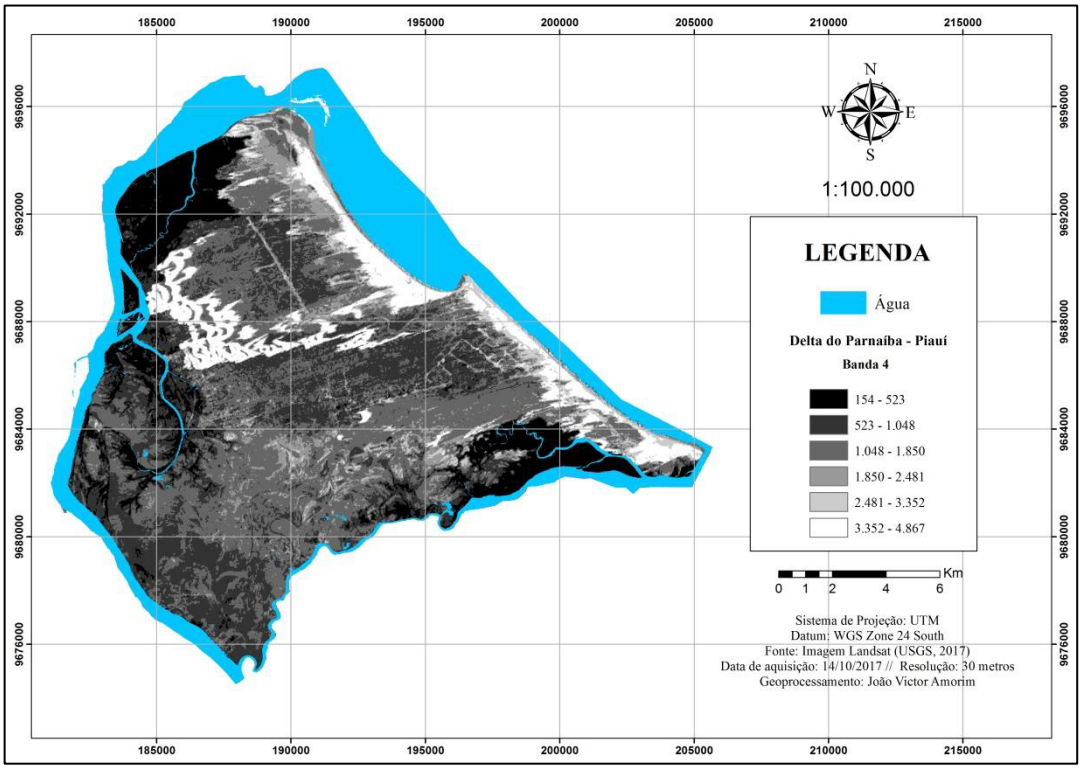


Figura 26 – Banda 4 (Red) do Landsat 8 do Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: USGS (2017), adaptado pelo autor.

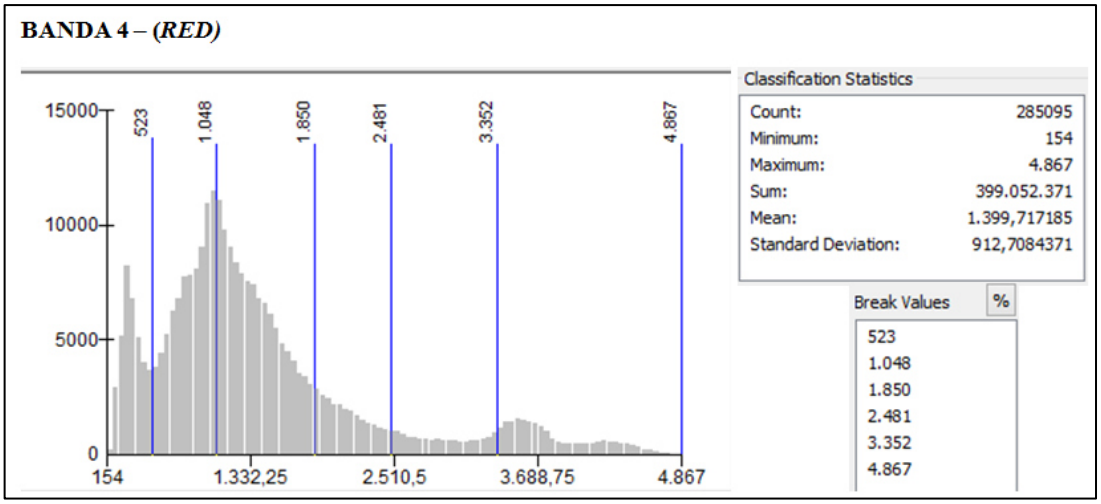


Figura 27 – Histograma de discretização das classes da banda 4

Fonte: organizado pelo autor.

A banda 6 (infravermelho de ondas curtas) (Figuras 28 e 29) analisada individualmente obteve resultados satisfatórios para uma diferenciação dos campos de dunas com as áreas de cordão arenoso e praia.

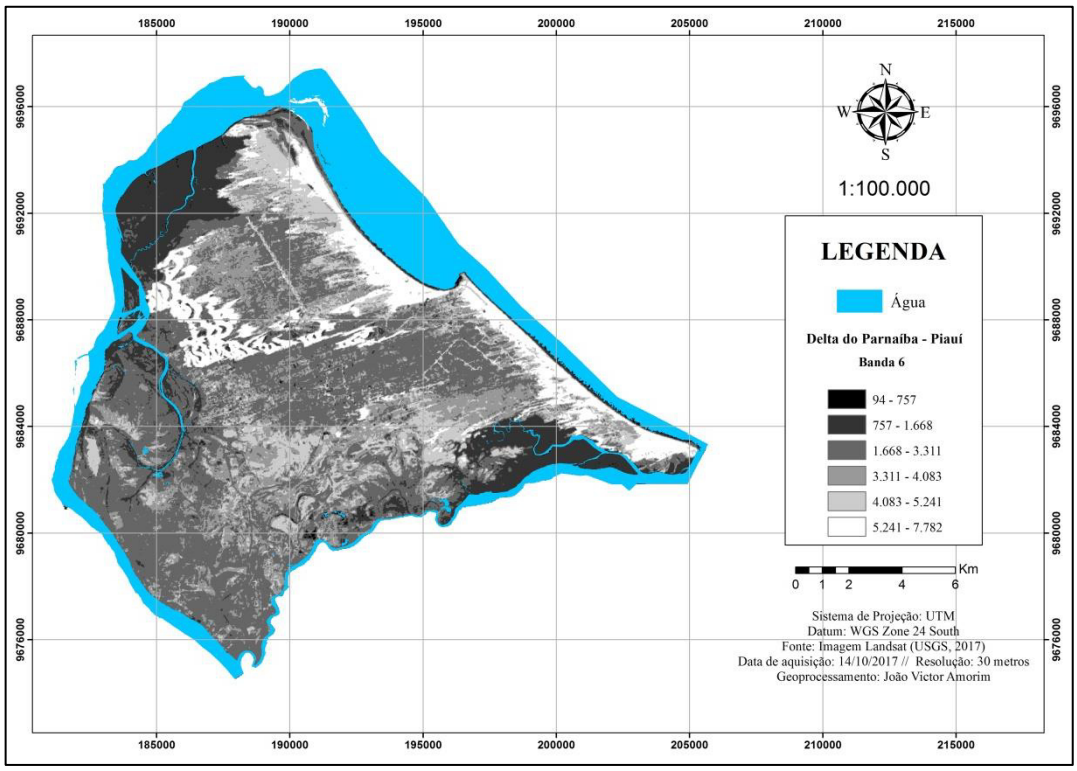


Figura 28 – Banda 6 (*Shortwave Infrared*) do Landsat 8 do Delta do Parnaíba – Piauí

Fonte: USGS (2017), adaptado pelo autor.

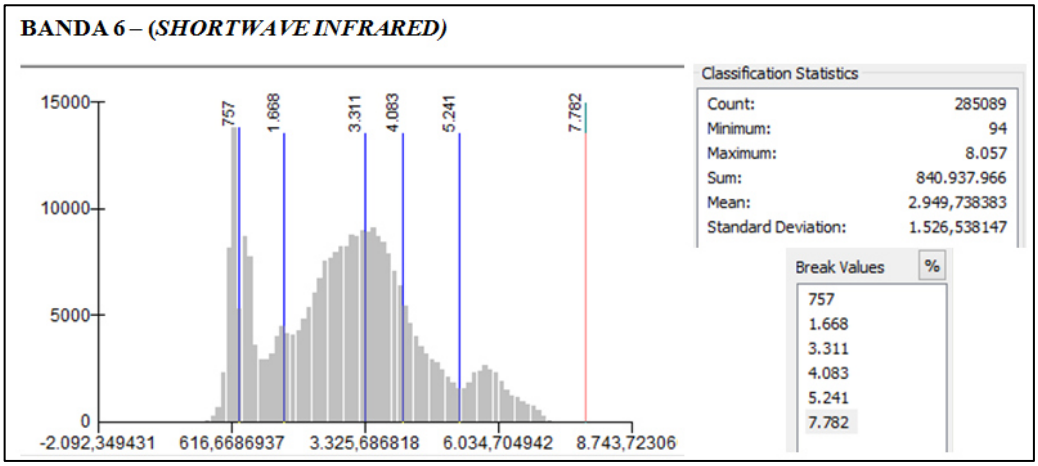


Figura 29 – Histograma e discretização das classes da banda 6

Fonte: elaborado pelo autor.

Além disso, proporcionou também uma melhor delimitação das florestas de mangue com os locais de vegetação paludosa. Apesar dos solos encontrados nesses locais apresentarem caráter semelhante, essas diferenciações são úteis no treinamento dos modelos de predição de solos. Ao observar a imagem, e a contrapondo com o mapa de cobertura da terra apresentado na figura 8 (item 3.5), também é possível identificar áreas em que toda ou quase toda a cobertura vegetal do solo foi removida (valores entre 4.083 e 5.241), principalmente pelo uso antrópico (pecuária extensiva). No período de estiagem podem ocorrer áreas com vegetação rasteira.

A imagem proveniente da banda termal foi discretizada em seis classes e apresentou variação, para a área de estudo, de 22,9 a 37,5 (Figuras 30 e 31). A banda termal do sensor TIRS permite, remotamente, a obtenção da estimativa da temperatura do solo por meio da transformação do número digital da imagem (ND) em radiância (MORAES et al., 2013). A conversão dos valores do arquivo matricial para temperatura estimada é realizado por meio da aplicação seguinte fórmula para imagem *Landsat 8*:

Temp. Superficie = (1321.08/Ln(774.89/(3.3420E-04* "banda10.tif" + 0.10000)+1))-273.15

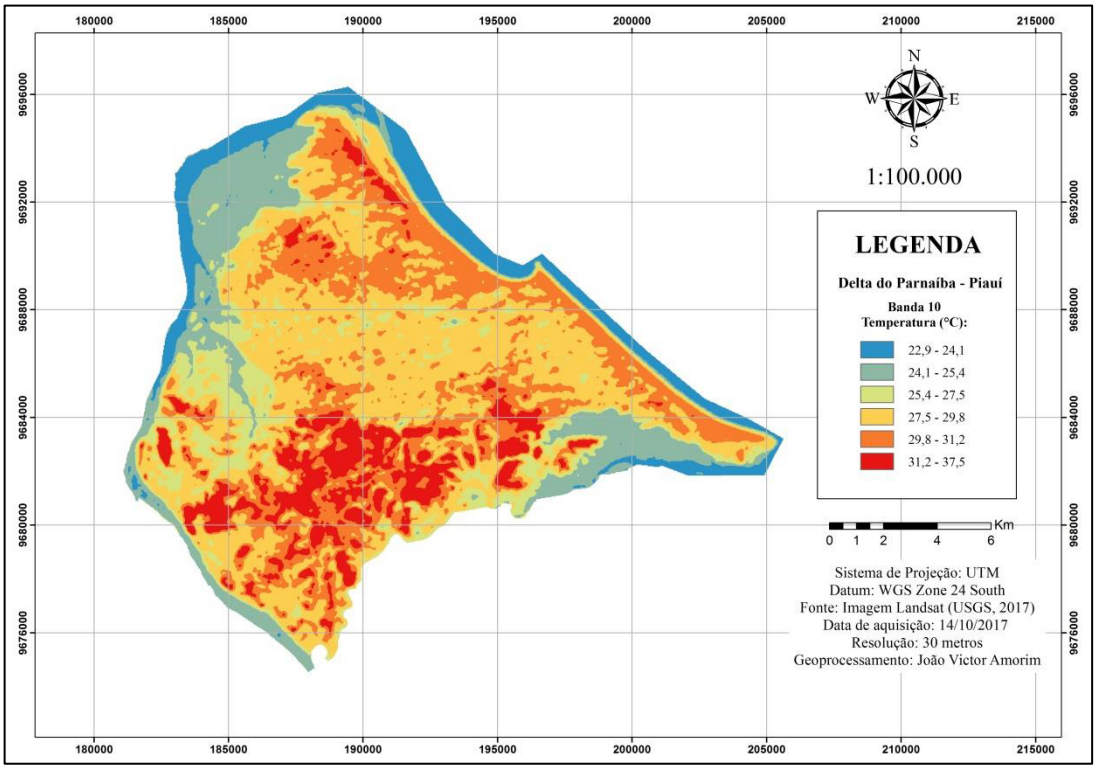


Figura 30 – Banda termal do sensor TIRS do Landsat 8 do Delta do Parnaíba - Piauí

Fonte: USGS (2017), adaptado pelo autor.

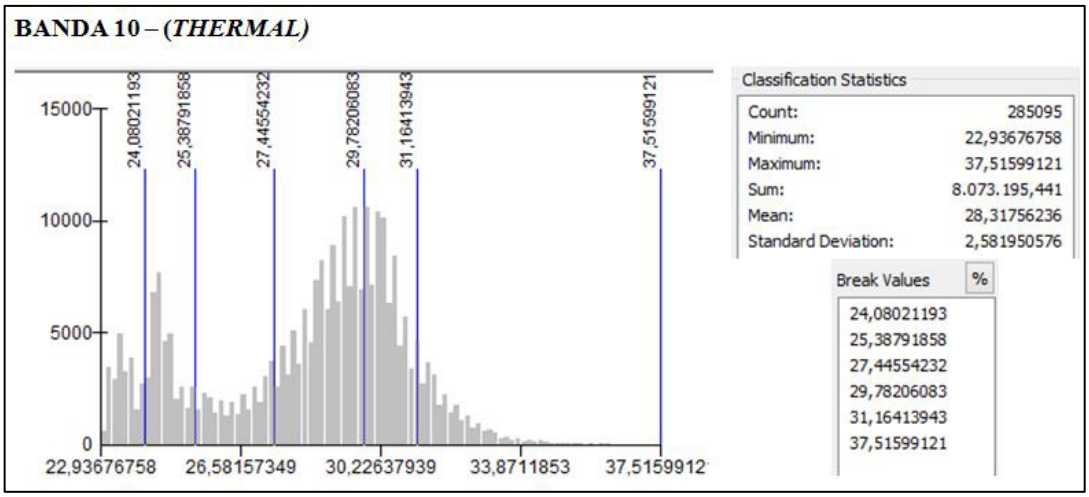


Figura 31 – Histograma e discretização das classes da banda termal

Fonte: elaborado pelo autor.

A classe com valores entre 24,1 e 25,9 classificou as áreas de Planície Flúvio-Marinha, sendo possível encontrar associações de solos hidromórficos, principalmente de GLEISSOLO TIOMÓRFICO + GLEISSOLO SÁLICO + GLEISSOLO MELÂNICO + ORGANOSSOLO TIOMÓRFICO, todos de textura argilosa ou indiscriminada.

A imagem também auxiliou na delimitação de áreas de depósitos fluvioaluvionares, com valores entre 31,2 e 37,5 representando associações principalmente de PLANOSSOLO NÁTRICO + CAMBISSOLO HÁPLICO + NEOSSOLO FLÚVICO + VERTISSOLO HÁPLICO, solos originados de sedimentos aluviais de textura indiscriminada.

A imagem resultante do índice *"Clay minerals"* (Figura 32) apresentou valores digitais com variação 0,43 a 3. Ao observar a imagem, percebe-se valores mais elevados para a presença de argilominerais ou minerais secundários presentes nos solos de áreas de Planície Flúvio-Marinha e Terraço Fluvial sendo possível correlacionar as associações de solos hidromórficos. Os valores mais baixos representam solos com maior presença de minerais primários, principalmente, as areais de quartzo encontrado nas áreas de dunas móveis, cordão arenoso e praia.

Valores intermediários não foram classificados efetivamente, tendo em vista a dificuldade de delimitar com maior clareza as unidades litoestratigráficas e geomorfológicas e associá-las com os solos, influências devido à cobertura vegetal em parte significativa da área de estudo.

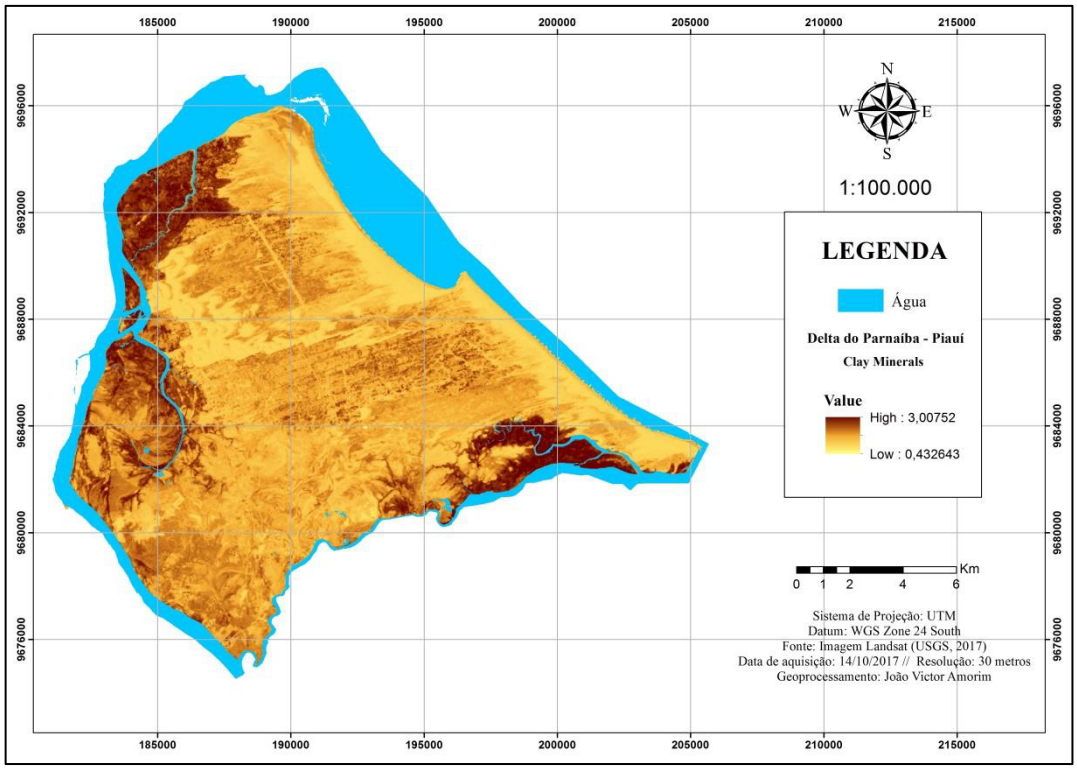


Figura 32 – Índice "*Clay Minerals*". Razão de bandas: 6/7

Fonte: USGS (2017), adaptado pelo autor.

A imagem da razão "*Iron Oxide*" mostra baixa reflexão, para solos com menor quantidade de óxidos de ferro em sua composição mineralógica e valores elevados em solos com maior quantidade (Figura 33). Para a área de estudo, a variação foi de -22,2 a 34,1. Com base na imagem é possível identificar valores mais elevados em áreas de dunas móveis e de depósitos fluvioaluvionares, com associações de solos arenosos e aluviais de textura indiscriminada, que apresentam quantidades consideráveis de minerais primários.

Os valores mais baixos indicam áreas de Depósitos de pântanos e mangues, indicando ocorrência de solos hidromórficos. Valores semelhantes podem ser encontrados também nas áreas de dunas estabilizadas e paleodunas. Nessas locais há o predomínio de espécies herbáceas e/ou arbustivas, como a *Scoparia dulcis L.* (Vassourinha) (GUZZI, 2012) e é comum encontrar corpos d'água devido à baixa posição no relevo e proximidade do lençol freático à superfície, podendo ocorrer solos de textura arenosa e com forte restrição à drenagem (NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico). Situação do relevo que provoca e redução dos óxidos de ferro e manganês para suas formas iônicas mais solúveis A figura 34 ilustra campos alagadiços/mal drenados na área.

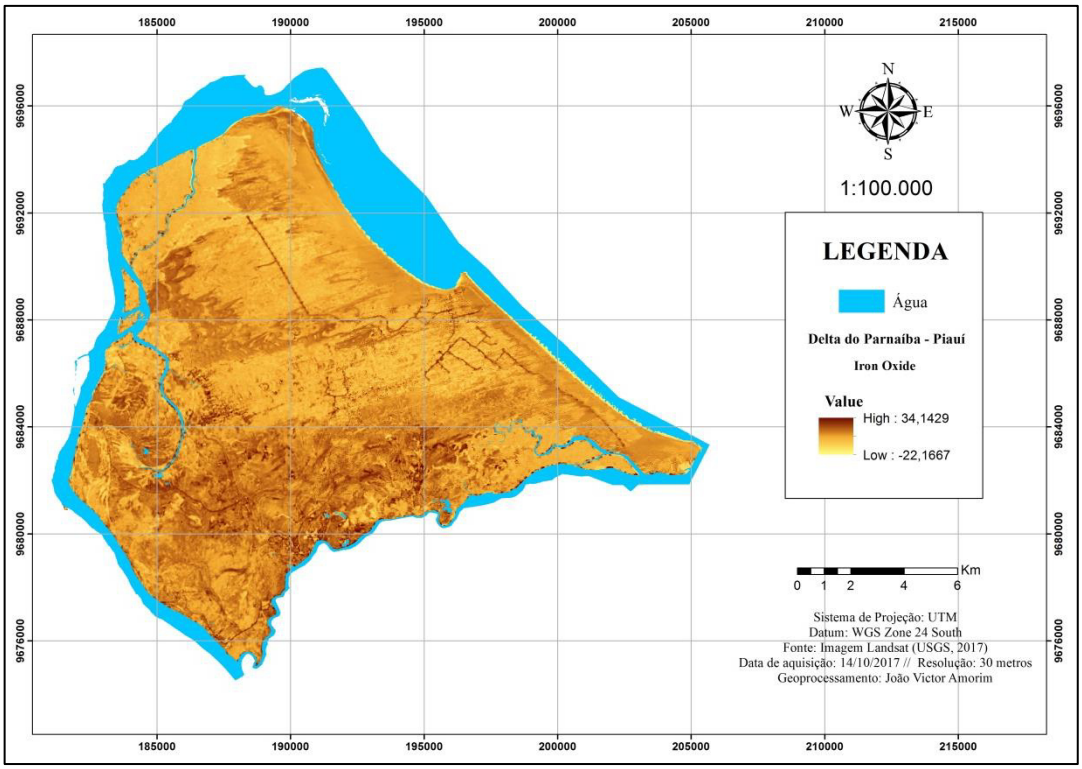


Figura 33 – Índice *"Iron Oxide"*. Razão de bandas: 4/2

Fonte: USGS (2017), adaptada pelo autor.



Figura 34 – Campos inundados no Delta do Parnaíba – Piauí (25/02/2016)

Fonte: Amorim (2017).

Ao comparar os dois índices, *"Clay Minerals"* e *"Iron Oxides",* percebe-se que são complementares, uma vez que ao ponto que o primeiro apresenta altos valores para áreas com predomínio de Gleissolos, por exemplo, o segundo apresenta valores inferiores para a mesma situação. Esse fato ajuda a delimitar de forma melhor as classes de solo da área e a treinar os modelos preditivos para o MDS.

Na imagem resultante do NDVI (Figura 35), o coeficiente calculado varia em uma escala compreendida entre -1 e +1, quanto mais próximo de -1 menor será o índice de vegetação e quanto mais próximo de 1 maior será o índice de vegetação. Para a banda *Landsat* na região do vermelho (V), a vegetação verde, densa e uniforme absorve mais energia. Por outro lado, para a banda infravermelho (NIR), os corpos d'água ficam absorvem mais e a vegetação verde, densa e uniforme reflete mais energia. Disto resulta uma nova banda espectral, representando a razão entre as bandas originais, onde as áreas claras indicam a presença de vegetação e as áreas escuras, sua ausência (FREIRE; PACHECO, 2005).

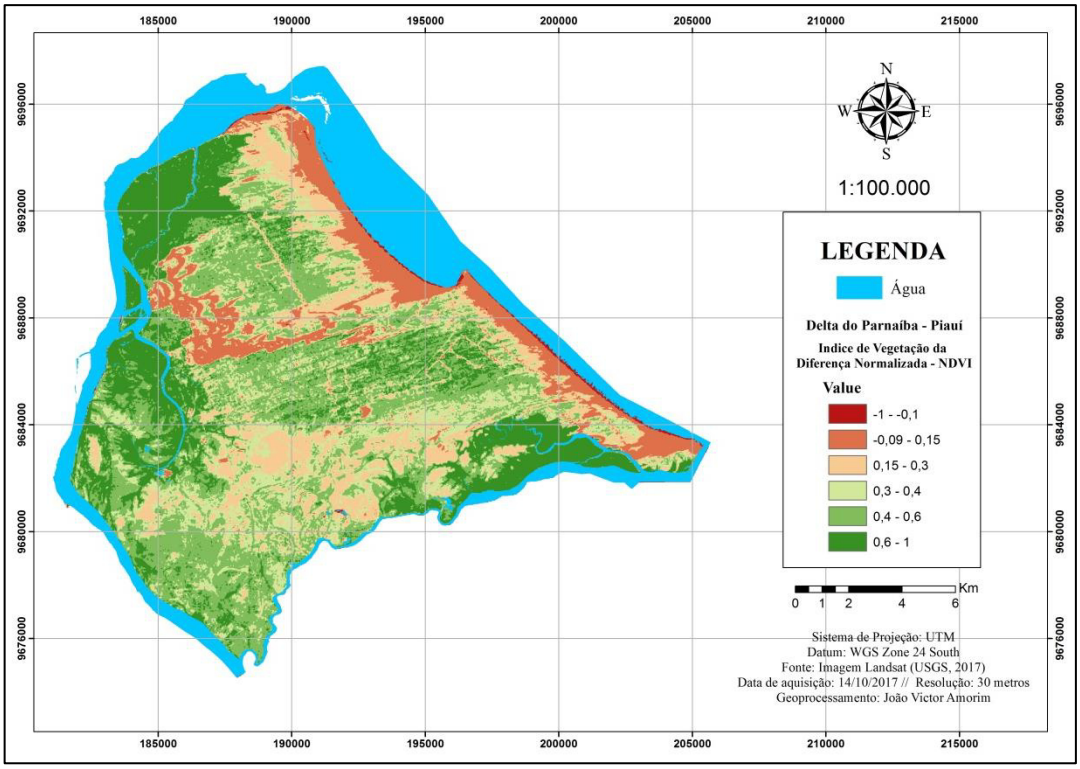


Figura 35 – Índice de Vegetação da Diferença Normalizada do Delta do Parnaíba

Fonte: USGS (2017), adaptado pelo autor.

Na área de estudo, fazendo associações com o mapa de cobertura da terra (Figura 8, item 3.5) os valores digitais dos pixels entre -1 e -0,10 indicaram corpos d´água. Os pixels

com valores -0,09 a 0,15 indicam áreas com baixa resposta da vegetação. Essas áreas correspondem a Dunas Móveis, Cordão arenoso e praia, constituídos predominantemente por materiais arenosos pouco consolidados, sendo encontradas associações de NEOSSOLO QUARTZARÊNICO + DUNAS MÓVEIS + ESPODOSSOLO HUMILÚVICO.

Valores entre 0,15 a 0,3 representam as áreas onde há presença de vegetação rasteira herbácea e/ou arbustiva, estando associado a ela, principalmente NEOSSOLO QUARTAZÊNICO + PLANOSSOLO NÁTRICO + CAMBISSOLO FLÚVICO. Pixels com valores entre 0,3 a 0,4 classificaram as áreas de campos naturais abertos.

Números digitais de 0,4 a 0,6 indicam áreas com predomínio de vegetação de porte mais arbustivo/arbóreo, ressaltando-se a ocorrência de espécies do tipo *Machaerium lunatum* (Jiquiriti), *Croton adenocalyx Baill* (Caatinga-branca), *Combretum laxum Jacq.* (Mufumbo), dentre outras (GUZZI, 2012). A figura 36 ilustra o histograma e discretização da razão das bandas NIR e V para a área de estudo.

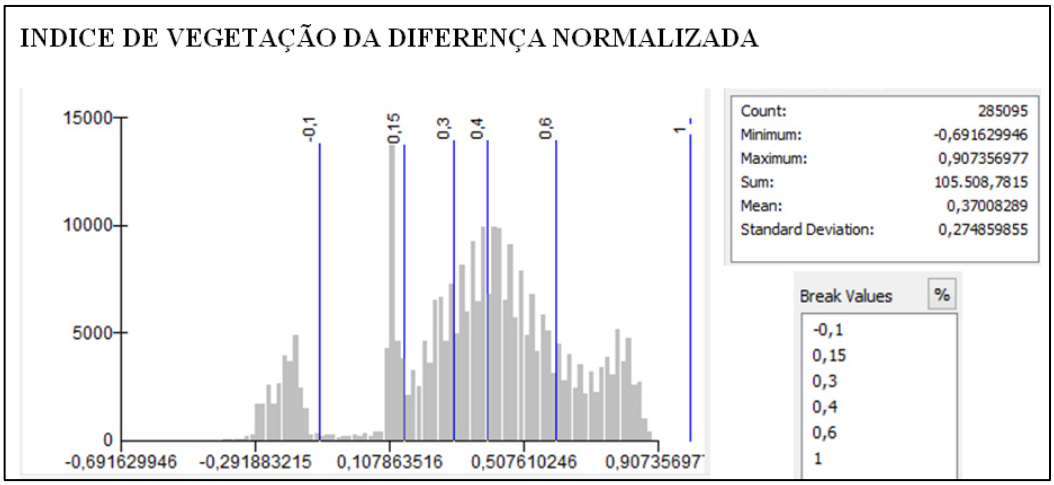


Figura 36 – Histograma e discretização das classes do NDVI

Fonte: elaborado pelo autor.

Interpretando os valores de 0,6 a 1, podem-se classificar as áreas de planícies flúvio-marinha, com vegetação arbórea densa de mangue e vegetação paludosa, resultado de uma alta resposta espectral da vegetação. Nessas áreas ocorrem associações principalmente de GLEISSOLO TIOMÓRFICO + GLEISSOLO SÁLICO + GLEISSOLO HÁPLICO + GLEISSOLO MELÂNICO + ORGANOSSOLO TIOMÓRFICO.

O NDWI (Figura 37) está altamente correlacionado com o conteúdo de água na cobertura vegetal e permite-nos acompanhar mudanças na biomassa e avaliar o estresse hídrico da vegetação.

Para a área de estudo os valores mais elevados indicam a presença de corpos d'água em áreas de grande acumulação de água, sendo possível encontrar nesses locais solos hidromórficos tanto Gleissolos em áreas de planície flúvio-marinha, quanto Neossolos Flúvicos em áreas de terraço fluvial.

Vale ressaltar que a imagem orbital foi obtida no mês de outubro, coincidindo com o período seco (pouca incidência pluviométrica). Nos meses mais chuvosos (primeiro trimestre do ano) é comum a concentração de água nos locais de planície eólica (campos abertos), como ilustram as figuras 38, 39 e 40, registros feito durante o respectivo período.

Os valores mais baixos estão expressos nas áreas de cordão arenoso, praia e dunas móveis, essencialmente.

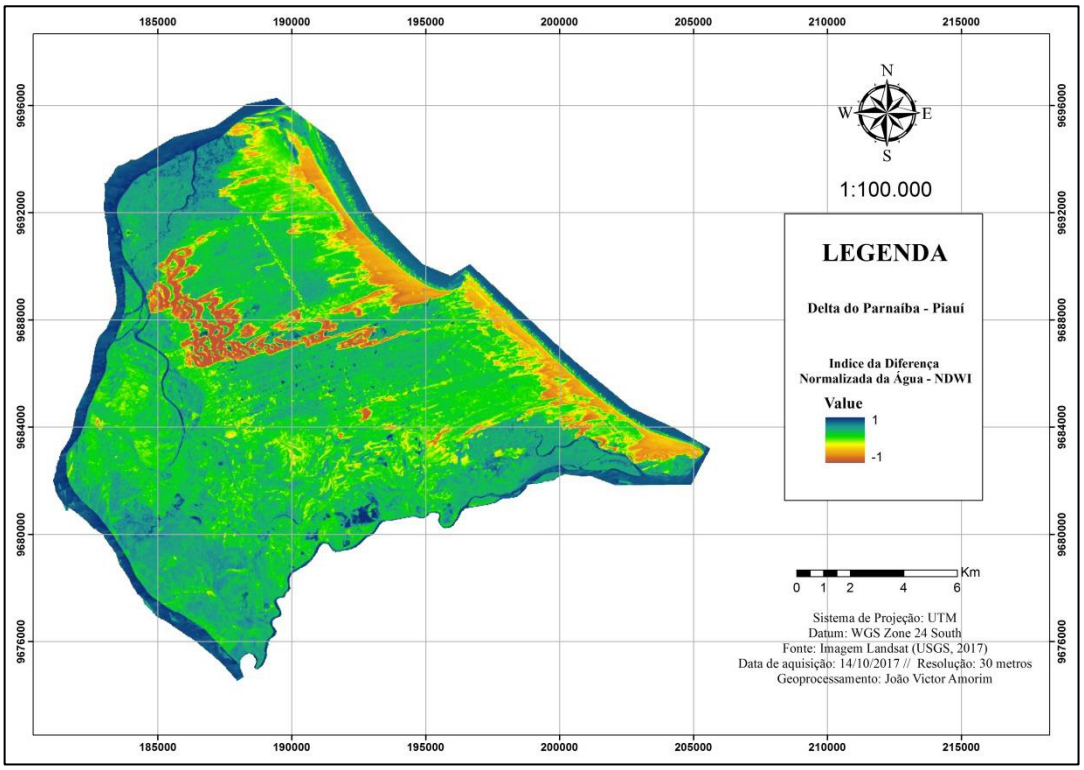


Figura 37 – Índice de Umidade por Diferença Normalizada do Delta do Parnaíba

Fonte: USGS (2017), adaptado pelo autor.



Figura 38 – Área de acumulação de água no período chuvoso no Delta do Parnaíba (a)

Fonte: pesquisa direta.



Figura 39 – Área de acumulação de água no período chuvoso no Delta do Parnaíba (b)

Fonte: pesquisa direta.



Figura 40 – Área de acumulação de água no período chuvoso no Delta do Parnaíba (c)

Fonte: pesquisa direta.

5.3 Treinamento dos dados

Através do cruzamento das variáveis preditivas com as classes de solos, unidades de mapeamento e características da paisagem, foi possível compor as 12 matrizes de dados, anteriormente descritos no item 4.2.3.2. Após a elaboração das matrizes de dados iniciaram-se as análises pelo programa Weka. Foi selecionada a opção "*cross validation*" com 10 partições para testar o algoritmo J48 (árvore de decisão) através da avaliação da acurácia.

O resultado dos valores de acerto dos algoritmos classificadores para cada matriz de dado está expresso na tabela 12, que segue. O processamento gera um valor de Kappa para cada conjunto testado (tabela 13).

Com base na tabela, para o algoritmo J48 e no tocante a todas as legendas elaboradas para a classificação, é possível inferir que os conjuntos que obtiveram maiores percentagens de acurácia foram aqueles que levaram em consideração todos os parâmetros preditivos (matrizes 4, 8 e 12). No que diz respeito às matrizes que analisaram a banda termal individualmente, a melhor classificação se deu nas matrizes 5 e 9, que possuem legendas baseadas nas unidades de mapeamento de solos e características da paisagem.

Tabela 12 – Resultados dos processamentos das matrizes de dados para o MDS do Delta do Parnaíba

Matrizes		Instâncias Corretamente Classificadas (%)
		J48
2º nível categórico	**Matriz 1**	35,7
	Matriz 2	36,7
	Matriz 3	18,4
	Matriz 4	41,8
Unidades de Mapeamento mapa pré-existente	**Matriz 5**	48,9
	Matriz 6	53,1
	Matriz 7	20,4
	Matriz 8	56,1
Características da paisagem	**Matriz 9**	57,1
	Matriz 10	57,1
	Matriz 11	43,9
	Matriz 12	75,5

Fonte: elaborado pelo autor.

As matrizes estabelecidas a partir dos produtos de sensoriamento remoto (matrizes 2, 6 e 10) apresentaram resultados medianos, destacando esses conjuntos de variáveis como determinantes para a classificação dos solos na área.

Com relação aos conjuntos de variáveis geomorfométricas (matrizes 3, 7 e 11), observa-se que foram os que obtiveram os valores mais baixos de acerto no algoritmo classificador. Esse resultado valida a hipótese posta no início da pesquisa, que fala sobre a baixa efetividade desses parâmetros na classificação, devido à pequena variabilidade dos atributos na área de estudo. Outra limitação se refere à resolução espacial do MDE empregado, seria necessário um produto com detalhamento maior para se verificar maior correlação dos atributos morfométricos com os solos.

A tabela 13 traz os valores do índice Kappa e para cada matriz de dado. De forma geral, também se pode afirmar que os resultados para as características da paisagem se sobressaíram em relação aos demais. No entanto, os resultados para unidades de mapeamento também se mostraram satisfatórios, sendo estes importantes para a classificação e apresentando maior confiabilidade para o MDS.

Tabela 13 – Valores de índice Kappa para cada matriz de dados determinado pelo Weka

Matrizes		Índice Kappa
		J48
2º nível categórico	**Matriz 1**	0,26
	Matriz 2	0,28
	Matriz 3	0,08
	Matriz 4	0,34
Unidades de Mapeamento mapa pré-existente	**Matriz 5**	0,35
	Matriz 6	0,41
	Matriz 7	0,01
	Matriz 8	0,45
Características da paisagem	**Matriz 9**	0,39
	Matriz 10	0,41
	Matriz 11	0,21
	Matriz 12	0,66

Fonte: elaborado pelo autor.

Para o J48, os conjuntos elaborados para associações da paisagem apresentaram os melhores resultados, sendo a matriz 12 a de maior porcentagem de acertos e de maior valor Kappa, de acordo com o software, como supracitado. As matrizes que apresentaram os melhores resultados dentro de cada conjunto foram a 4, 8 e 12. Para matriz 4 as regras ou conjunto completo de treinamento da árvore de decisão foram organizados automaticamente como ilustra a figura 41.

Com base no modelo verifica-se que os parâmetros utilizados pelo algoritmo classificador foram: banda termal, banda 2, *Iron Oxide*, NDWI, curvatura, fluxo acumulado, NDVI, *Clay Minerals* e direção de fluxo. A banda termal foi o atributo de maior representatividade no processamento, sendo responsável pela classificação dos pontos de GLEISSOLO TIOMÓRFICO, além das classes P e DM com o auxílio da banda 2, do *Iron Oxide*, fluxo acumulado e NDWI. Nesse modelo, observa-se que os parâmetros geomorfométricos e de sensoriamento remoto tiveram expressão equivalente no processamento.

A figura 42 traz a matriz de confusão gerada automaticamente pelo programa após o processamento. Observa-se que das 14 células previamente classificadas como GJ, 13 foram classificadas corretamente (92,8%), representando a classe com maior porcentagem de acerto. No geral, a maioria das células classificadas previamente como GLEISSOLO no primeiro nível categórico, após o processamento foram classificadas também como GLEISSOLO

porém com diferenças no segundo nível. A exceção para essa afirmativa se dá apenas na classificação do GM e GS que tiveram pontos classificados como RY.

```
=== Classifier model (full training set) ===

J48 pruned tree
------------------

B10 <= 27662: GJ (15.0/1.0)
B10 > 27662
|   B2 <= 1140
|   |   B10 <= 30063
|   |   |   B2 <= 490
|   |   |   |   CUR <= 0.314603
|   |   |   |   |   B2 <= 417
|   |   |   |   |   |   FAC <= 2
|   |   |   |   |   |   |   FAC <= 0
|   |   |   |   |   |   |   |   FD <= 32: GS (3.0)
|   |   |   |   |   |   |   |   FD > 32: GX (2.0)
|   |   |   |   |   |   |   FAC > 0: GX (3.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   FAC > 2: RY (4.0/1.0)
|   |   |   |   |   B2 > 417
|   |   |   |   |   |   NDWI <= 3676.71: RY (5.0)
|   |   |   |   |   |   NDWI > 3676.71: CY (3.0/1.0)
|   |   |   |   CUR > 0.314603: GM (2.0/1.0)
|   |   |   B2 > 490
|   |   |   |   FAC <= 0
|   |   |   |   |   B2 <= 626
|   |   |   |   |   |   IRON <= 1.67536: RQ (2.0)
|   |   |   |   |   |   IRON > 1.67536: RY (2.0)
|   |   |   |   |   B2 > 626: GX (2.0/1.0)
|   |   |   |   FAC > 0: RQ (15.0/4.0)
|   |   B10 > 30063
|   |   |   NDWI <= 4171.13
|   |   |   |   ALT <= 0
|   |   |   |   |   IRON <= 2.02484: SN (2.0)
|   |   |   |   |   IRON > 2.02484: VX (3.0/1.0)
|   |   |   |   ALT > 0
|   |   |   |   |   CLAY <= 1.5662: CY (3.0)
|   |   |   |   |   CLAY > 1.5662: RY (3.0/1.0)
|   |   |   NDWI > 4171.13
|   |   |   |   FAC <= 0
|   |   |   |   |   CLAY <= 1.50139: SN (5.0)
|   |   |   |   |   CLAY > 1.50139: GS (2.0)
|   |   |   |   FAC > 0: GS (4.0)
|   B2 > 1140
|   |   IRON <= 1.8867
|   |   |   FAC <= 2: P (8.0)
|   |   |   FAC > 2
|   |   |   |   NDVI <= 0.111022: P (2.0)
|   |   |   |   NDVI > 0.111022: RQ (2.0)
|   |   IRON > 1.8867: DM (6.0/1.0)

Number of Leaves  :     23

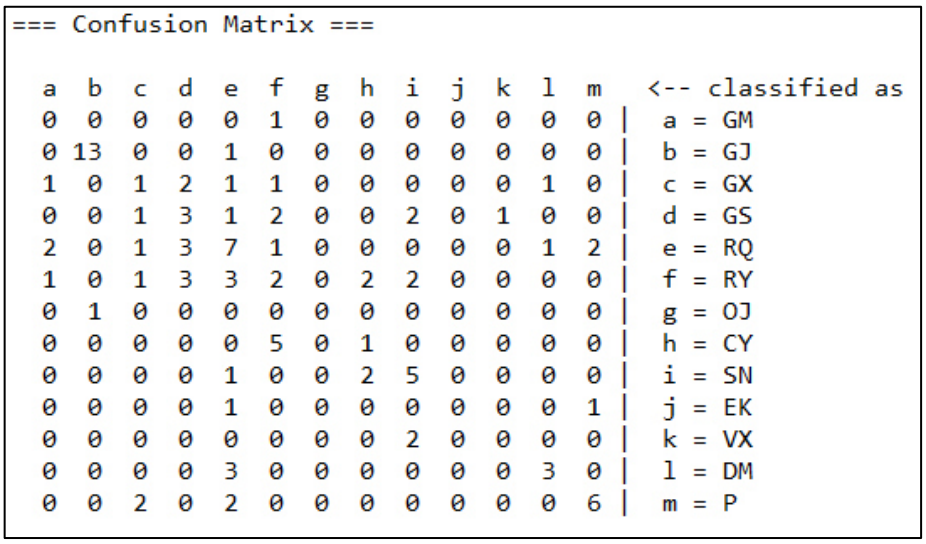
Size of the tree :      45
```

Figura 41 – Modelo classificador e conjunto completo de treinamento para a matriz de dados 4

Fonte: WEKA, 2019.

Para esse modelo a segunda classe com maior porcentagem de acerto foi RQ, com 50%, tendo sete células classificadas corretamente de um total de 14. Porém, das células restantes seis foram classificadas como GLEISSOLO. Outra classe que merece destaque é a

do CY, que teve 83,3% das células classificadas como RY. Como justificativa a esse resultado atribui-se a fisionomia da paisagem, aspecto da vegetação e material de origem de ambas as classes de solo.



```
=== Confusion Matrix ===

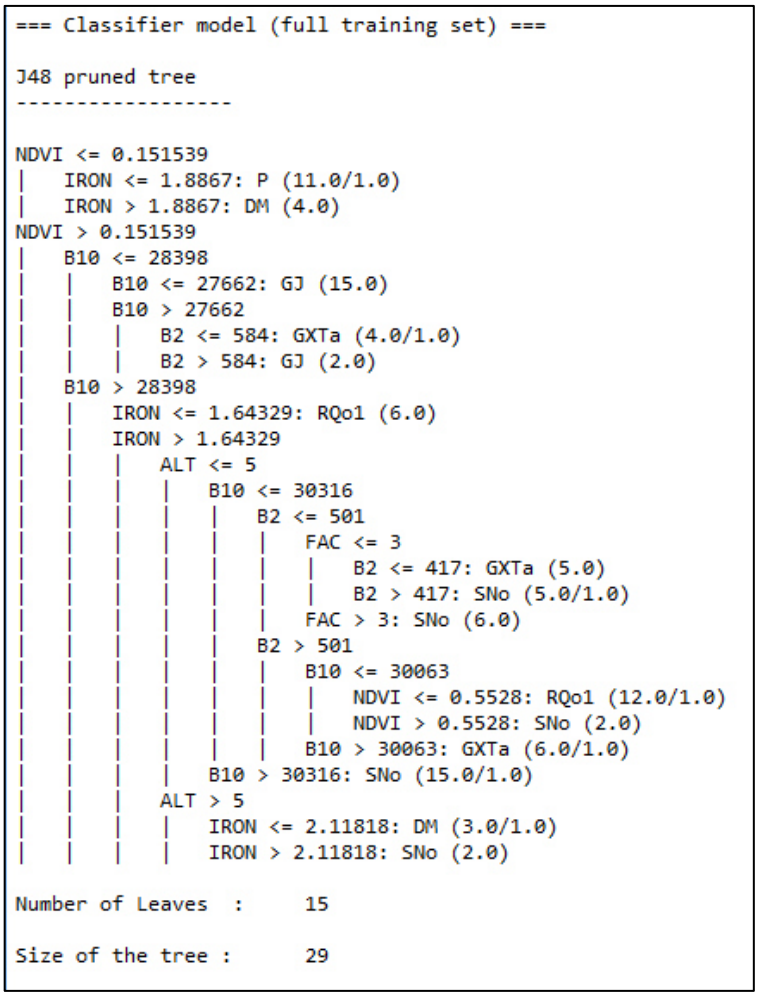
  a  b  c  d  e  f  g  h  i  j  k  l  m   <-- classified as
  0  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0 |  a = GM
  0 13  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0 |  b = GJ
  1  0  1  2  1  1  0  0  0  0  0  1  0 |  c = GX
  0  0  1  3  1  2  0  0  2  0  1  0  0 |  d = GS
  2  0  1  3  7  1  0  0  0  0  0  1  2 |  e = RQ
  1  0  1  3  3  2  0  2  2  0  0  0  0 |  f = RY
  0  1  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0 |  g = OJ
  0  0  0  0  0  5  0  1  0  0  0  0  0 |  h = CY
  0  0  0  0  1  0  0  2  5  0  0  0  0 |  i = SN
  0  0  0  0  1  0  0  0  0  0  0  0  1 |  j = EK
  0  0  0  0  0  0  0  0  2  0  0  0  0 |  k = VX
  0  0  0  0  3  0  0  0  0  0  0  3  0 |  l = DM
  0  0  2  0  2  0  0  0  0  0  0  0  6 |  m = P
```

Figura 42 – Matriz de confusão gerada pelo Weka para a matriz de dados 4

Fonte: WEKA, 2019.

Para a matriz de dados 8 verifica-se que o modelo classificador selecionou os parâmetros NDVI, *Iron Oxide*, banda termal, banda 2, altimetria e fluxo acumulado, como os de maior predominância para a classificação, conforme a figura 43. De acordo com o modelo o NDVI e *Iron Oxide* foram suficientes para classificar P e DM. A banda termal também se sobressaiu na classificação, delimitando, com auxílio da banda 2, as áreas de GJ e GXTa. Os atributos altimetria e fluxo acumulado entraram refinando o modelo para a delimitação das demais classes, principalmente SNo.

Com base na matriz de confusão (Figura 44) observa-se que das dezessete células previamente indicadas como GJ, dezessete foram classificadas corretamente, apresentando um percentual de acerto de 82,3%. Apenas metade das células indicadas como GXTa foram corretamente classificadas, sendo que do total, 37,5% foram enquadrados como SNo. Uma justificativa para esse resultado se dá por conta dos GS presentes nessa classe estarem localizados em ambientes semelhantes os de RY representativos de SNo. A classe SNo apresentou acerto em dezessete células de um total de trinta (57%), tendo 20% das células restantes classificadas como associações de Gleissolos.



```
=== Classifier model (full training set) ===

J48 pruned tree
------------------

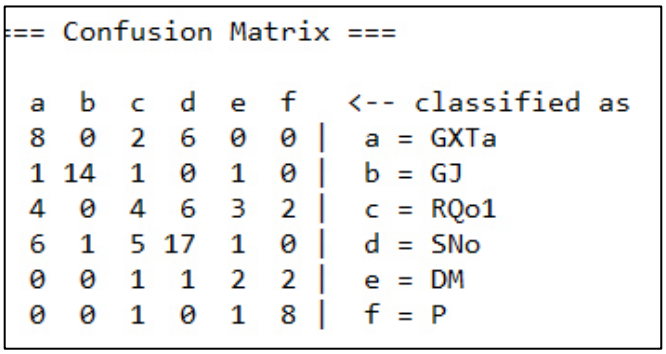
NDVI <= 0.151539
|   IRON <= 1.8867: P (11.0/1.0)
|   IRON > 1.8867: DM (4.0)
NDVI > 0.151539
|   B10 <= 28398
|   |   B10 <= 27662: GJ (15.0)
|   |   B10 > 27662
|   |   |   B2 <= 584: GXTa (4.0/1.0)
|   |   |   B2 > 584: GJ (2.0)
|   B10 > 28398
|   |   IRON <= 1.64329: RQo1 (6.0)
|   |   IRON > 1.64329
|   |   |   ALT <= 5
|   |   |   |   B10 <= 30316
|   |   |   |   |   B2 <= 501
|   |   |   |   |   |   FAC <= 3
|   |   |   |   |   |   |   B2 <= 417: GXTa (5.0)
|   |   |   |   |   |   |   B2 > 417: SNo (5.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   FAC > 3: SNo (6.0)
|   |   |   |   |   B2 > 501
|   |   |   |   |   |   B10 <= 30063
|   |   |   |   |   |   |   NDVI <= 0.5528: RQo1 (12.0/1.0)
|   |   |   |   |   |   |   NDVI > 0.5528: SNo (2.0)
|   |   |   |   |   |   B10 > 30063: GXTa (6.0/1.0)
|   |   |   |   B10 > 30316: SNo (15.0/1.0)
|   |   |   ALT > 5
|   |   |   |   IRON <= 2.11818: DM (3.0/1.0)
|   |   |   |   IRON > 2.11818: SNo (2.0)

Number of Leaves  :     15

Size of the tree :      29
```

Figura 43 – Modelo classificador e conjunto completo de treinamento para a matriz de dados 8

Fonte: WEKA, 2019.



```
=== Confusion Matrix ===

 a  b  c  d  e  f   <-- classified as
 8  0  2  6  0  0 |  a = GXTa
 1 14  1  0  1  0 |  b = GJ
 4  0  4  6  3  2 |  c = RQo1
 6  1  5 17  1  0 |  d = SNo
 0  0  1  1  2  2 |  e = DM
 0  0  1  0  1  8 |  f = P
```

Figura 44 – Matriz de confusão gerada pelo Weka para a matriz de dados 8

Fonte: WEKA, 2019.

O modelo classificador da matriz 12 é apresentado na figura 45. Com base no modelo verifica-se que os parâmetros utilizados pelo algoritmo classificador foram: NDVI,

Iron Oxide, banda termal, banda 2, *Clay Minerals*, banda 4, altimetria e curvatura. O NDVI foi decretório para a construção do modelo, sendo capaz de separar individualmente duas classes P e DM com o auxílio do *Iron Oxide*. Outro atributo de grande representatividade foi a banda termal. Através da sua capacidade em determinar a umidade dos solos foi capaz de identificar a classe H.

Para a determinação das demais classes os demais parâmetros entraram na classificação. Porém vale ressaltar que os atributos geomorfométricos tiveram menor expressão, resultado já esperado, conforme justificado anteriormente, entrando no modelo apenas altimetria e curvatura. A figura 46 ilustra a matriz de confusão gerada automaticamente pelo software para a classificação.

```
=== Classifier model (full training set) ===

J48 pruned tree
------------------

NDVI <= 0.151539
|   IRON <= 1.8867: P (11.0/1.0)
|   IRON > 1.8867: DM (4.0)
NDVI > 0.151539
|   B10 <= 28398: H (21.0/1.0)
|   B10 > 28398
|   |   B10 <= 30063
|   |   |   B2 <= 490
|   |   |   |   CLAY <= 1.97182
|   |   |   |   |   B4 <= 797
|   |   |   |   |   |   B10 <= 29188: H (4.0)
|   |   |   |   |   |   B10 > 29188: AL (3.0)
|   |   |   |   |   B4 > 797: AL (9.0)
|   |   |   |   CLAY > 1.97182: AR (2.0)
|   |   |   B2 > 490
|   |   |   |   ALT <= 5
|   |   |   |   |   CUR <= 0.209735: AR (14.0/1.0)
|   |   |   |   |   CUR > 0.209735
|   |   |   |   |   |   B2 <= 584: AL (2.0)
|   |   |   |   |   |   B2 > 584: AR (2.0)
|   |   |   |   ALT > 5
|   |   |   |   |   B2 <= 600: AR (2.0/1.0)
|   |   |   |   |   B2 > 600: DM (2.0)
|   |   B10 > 30063: AL (22.0)

Number of Leaves  :     13

Size of the tree :      25
```

Figura 45 – Modelo classificador e conjunto completo de treinamento para a matriz de dados 12

Fonte: WEKA, 2019.

Ao analisar a figura 46 percebe-se que das vinte e quatro células previamente indicadas como H, dezoito foram classificadas corretamente (75%). Das dezenove definidas

como AR, dez obtiveram resultado positivo, representando 52,6% de acerto. As células indicadas como AL obtiveram 84,6% de acerto, com trinta e três unidades classificadas corretamente.

```
=== Confusion Matrix ===

 a  b  c  d  e   <-- classified as
18  1  4  1  0 |  a = H
 2 10  4  1  2 |  b = AR
 3  3 33  0  0 |  c = AL
 0  2  0  2  2 |  d = DM
 0  0  0  0 10 |  e = P
```

Figura 46 – Matriz de confusão gerada pelo Weka para a matriz de dados 12

Fonte: WEKA, 2019.

Para DM a porcentagem de acerto foi de apenas 33,3%, porém as células restantes foram classificadas como P e AR, o que demonstra um bom desempenho do algoritmo classificador, uma vez que essas também são provenientes de material arenoso. A classe P obteve 100% de acerto, tendo suas dez células classificadas corretamente.

5.4 Mapeamento Digital de Solos no Delta do Parnaíba e avaliação da acurácia

As matrizes de dados 4, 8 e 12, para o algoritmo J48, foram as que apresentaram os melhores resultados de acerto e Kappa de acordo com o modelo de classificação do Weka. Nessa perspectiva, para a elaboração dos mapas pedológicos digitais da área essas matrizes foram consideradas. Estes mapas foram validados por meio de matriz de erro que confronta as classes preditas pelo modelo com as classes reais identificadas em campo nos 21 pontos pré-selecionados para esta validação.

Além disso, os mapas derivados das matrizes 8 e 12 também foram cruzados com o mapa pedológico convencional pré-existente, conforme os procedimentos descritos no item 4.2.5. A figura 47 ilustra o mapa pedológico digital do Delta do Parnaíba gerado através da matriz de dados 4.

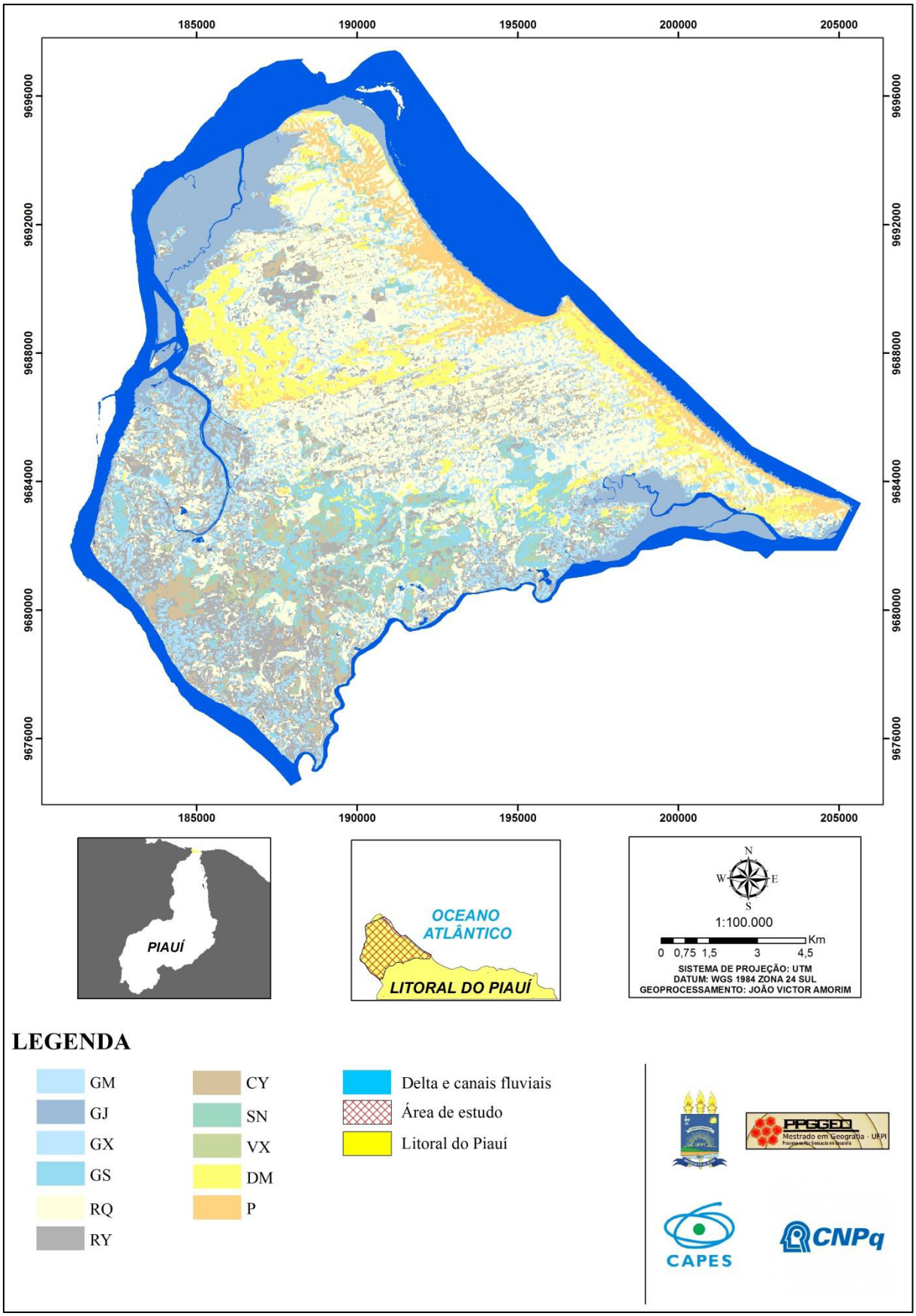


Figura 47 – Mapa pedológico digital gerado a partir da matriz de dados 4

Fonte: elaborado pelo autor.

As classes preditas com maior expressão no mapa foram os NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS com textura arenosa, que abrangem cerca de 70,23 km² (30,23%) concentrados principalmente nas áreas de planície eólica com predomínio de vegetação arbustiva densa e os NEOSSOLOS FLÚVICOS de textura indiscriminada (33,56 km², 14,44%) distribuídos nas áreas de planície e terraço fluvial.

Os GLEISSOLOS (Tiomórficos, Háplicos, Sálicos e Melânico) que se concentram no norte da área, nas áreas de mangue e vegetação paludosa, também representam juntos área significativa (74,44 km², 32,04%). As áreas de CAMBISSOLOS FLÚVICOS tiveram expressão relativamente baixa, estendendo-se por aproximadamente 14,90 km², 6,41%.

As classes preditas que ocuparam menor área foram os PLANOSSOLOS NÁTRICOS (6,96 km², 3%), as Praias (12,95 km², 5,57%) e os VERTISSOLOS HÁPLICOS (0,74%).

Quando validado com o conjunto de validação, por meio da matriz de erros (tabela 14), a exatidão global foi de 42,87% e o índice Kappa de 0,35, indicando concordância considerável segundo critério Landis e Koch (1977) e evidenciando um valor superior ao gerado pelo processamento no Weka. Cabe destacar que, conforme Ten Caten (2011a) o valor médio do índice Kappa entre os estudos realizados no país é de 0,47. Esse valor é similar ao reportado na literatura internacional, como em Hengl e Rossiter (2003), por exemplo, de 0,39 para áreas planas.

Tabela 14 – Matriz de confusão do conjunto de dados 4 (pontos classificados em campo)

	GJ	**GX**	**GS**	**RQ**	**RY**	**SN**	**VX**	**DM**	**P**	**TOTAL**
GJ	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2
GX	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
GS	0	1	1	0	0	0	0	0	0	3
RQ	0	0	0	1	0	1	0	1	1	4
RY	0	0	1	0	2	0	0	0	0	3
SN	0	0	1	1	0	1	0	0	0	3
VX	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
DM	0	0	0	1	0	0	0	1	1	3
P	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
TOTAL	2	1	4	4	2	2	0	2	3	**21**

Fonte: elaborado pelo autor.

As classes GX e VX apresentaram valor zero para exatidão do produtor (%), isso significa que nenhum dos pontos classificados em campo como pertencentes a estas duas

classes foi predito de maneira correta. Por outro lado, os GJ, RY e os SN apresentaram os maiores valores, sendo 100%, 100% e 50% respectivamente.

Em se tratando da exatidão do usuário (%), as classes de solo GJ, RY e classe P obtiveram os melhores índices (100%, 66% e 100% respectivamente). Os piores foram identificados nas classes dos RQ, GX e VX (25%, zero e zero). Vale ressaltar que após o processamento do mapa as classes OJ e EK não foram representadas no mapa digital por não terem pontos classificados corretamente no modelo.

O mapa pedológico digital gerado a partir da matriz de dados 8 encontra-se representado na figura 48. Para esse processamento, a classe de maior abrangência foi a RQo1, que compreende uma área de 89,28 km² (38,57%). Nessa classe destacam-se os NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS de textura arenosa em todos os horizontes, com estrutura de grão simples e maciça. Apresentam o mineral quartzo como predominante em todas as suas frações, de acordo com as análises físicas. A figura 49 ilustra um perfil representativo dessa classe.

Além dos RQ também são encontrados nessa classe os ESPODOSSOLOS HUMILÚVICOS, solos arenosos que apresentam horizonte B espódico, com acumulação iluvial de matéria orgânica humificada, combinada com alumínio, com cor cinzenta muito escuro (10YR 3/1) no horizonte Bh do perfil P36 e no perfil P37 o horizonte Bh de cor preta (7,5YR 2,5/1), característica também para o 2° nível categórico (figura 50).

A segunda classe de maior abrangência foi SNo (42,11 km², 18,19%). Dentre os solos destaca-se a ocorrência de NEOSSOLOS FLÚVICOS, solos minerais pouco evoluídos, formados a partir de depósitos aluviais recentes.

Alguns perfis (P27 e P28) apresentam camadas estratificadas, com variações irregulares de granulometria em profundidade, sendo outra característica evidenciada também a distribuição irregular do conteúdo de carbono orgânico.

Além dos NEOSSOLOS FLÚVICOS, ocorrem também CAMBISSOLOS FLÚVICOS constituídos por material mineral com horizonte B incipiente, representado por Bv, subjacente ao horizonte A, com grau de desenvolvimento não muito avançado e variações irregulares de granulometria em profundidade (Figura 51).

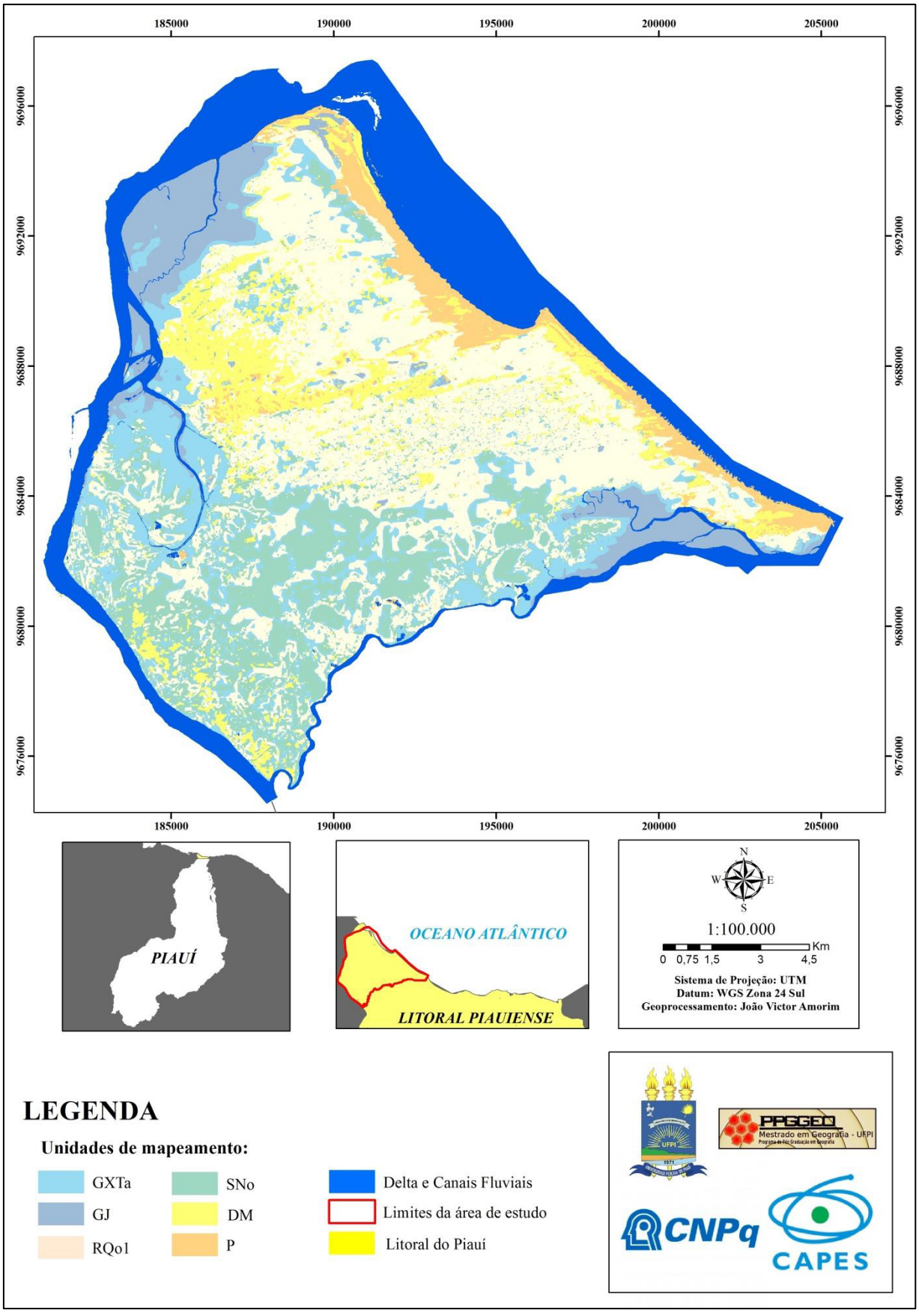


Figura 48 – Mapa pedológico digital gerado a partir da matriz de dados 8

Fonte: elaborado pelo autor.

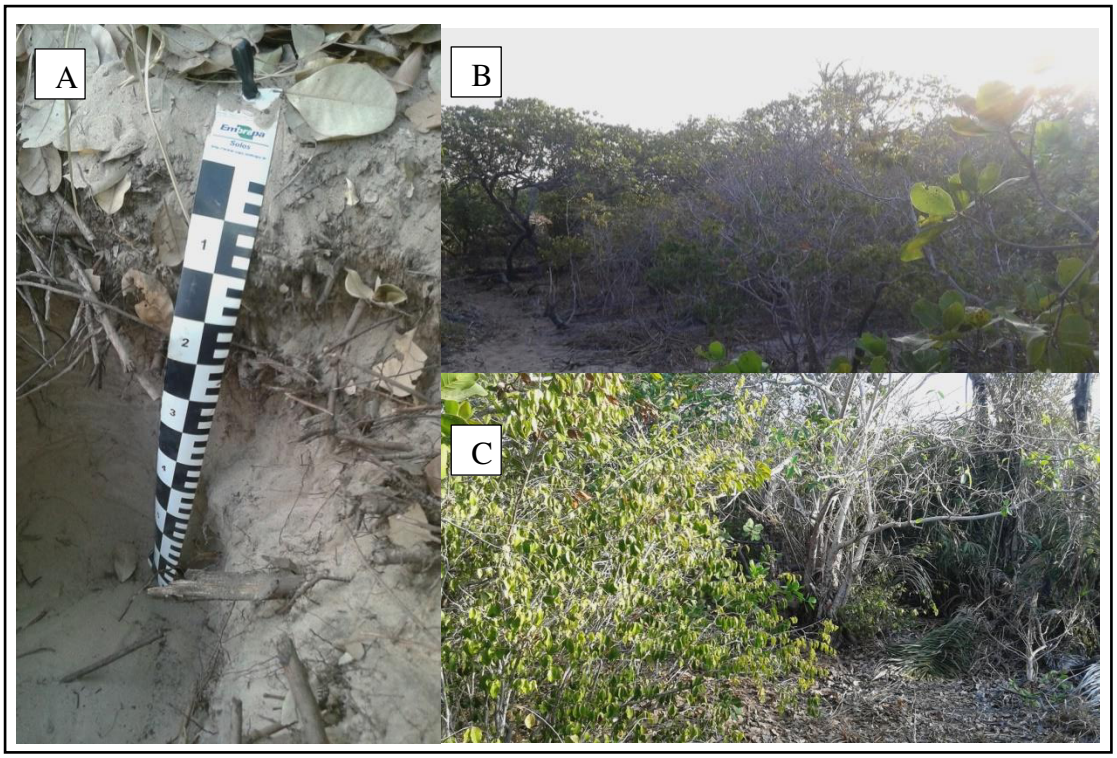


Figura 49 – Perfil representativo da classe RQo1 (Solos arenosos); (A) Perfil de solo P30; (B) e (C) paisagem do perfil

Fonte: pesquisa direta.

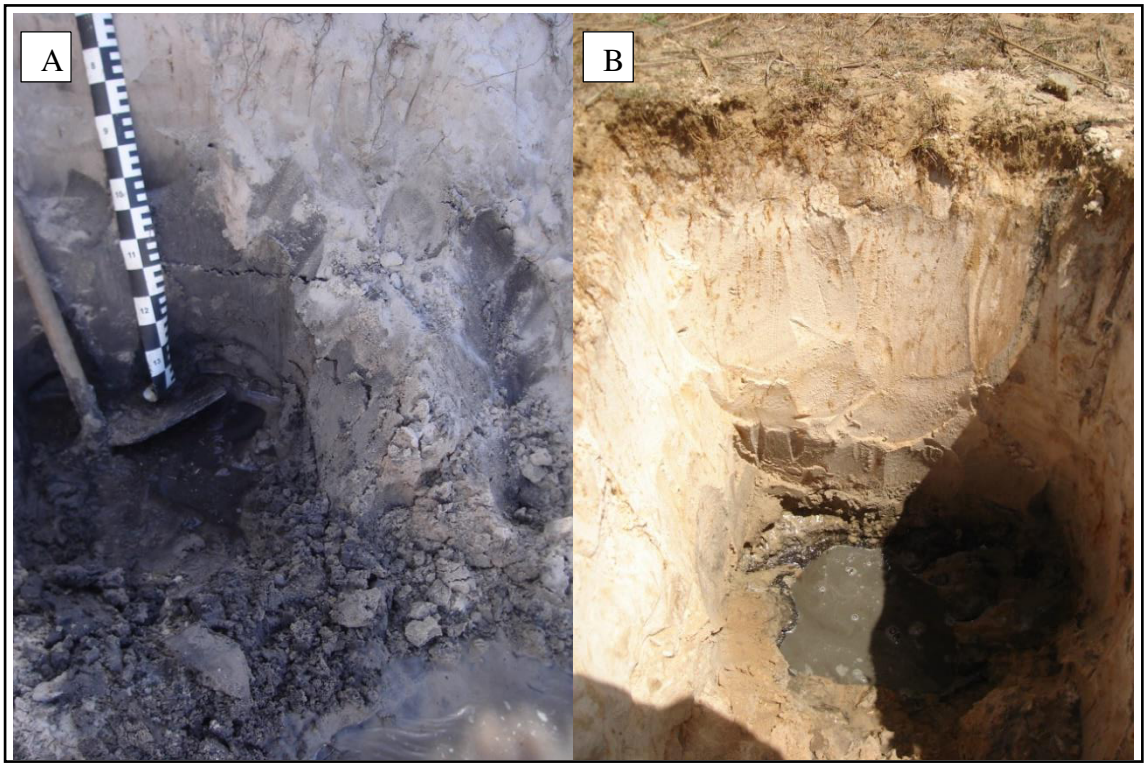


Figura 50 – Perfis representativos de ESPOSSOLO HUMILÚVICO; (A) P36; (B) P40

Fonte: pesquisa direta.

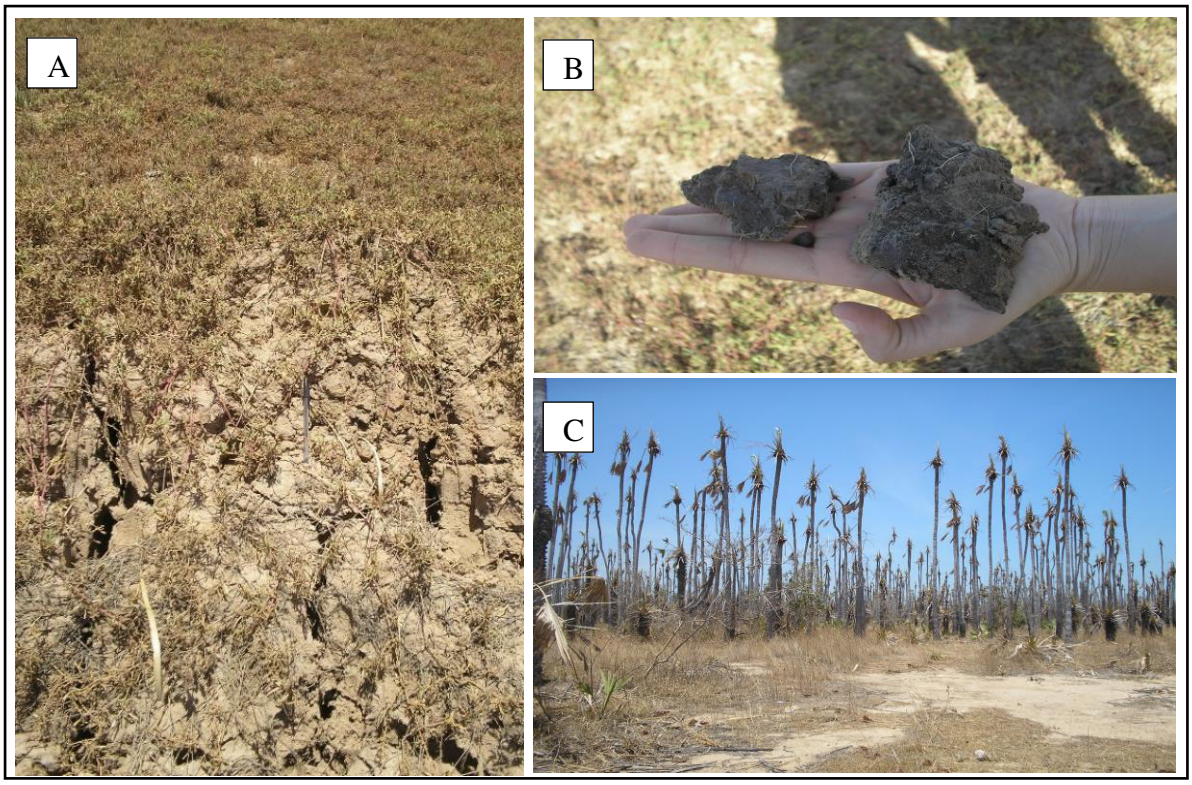


Figura 51 – Perfil representativo de CY; (A) P41; (B) e (C) paisagem do perfil

Fonte: pesquisa direta.

Há também na classe SNo a ocorrência de PLANOSSOLOS NÁTRICOS, solos de alta saturação por sódio, estrutura prismática ou colunar. Seu gradiente textural elevado causa grande suscetibilidade à erosão, também favorecida pela baixa permeabilidade do horizonte B, devido à alta concentração de sódio (Figura 52a). E VERTISSOLOS HÁPLICOS, constituídos por material mineral, apresentando características vérticas nos horizontes, aparecimento de fenda vertical no período seco devido à contração e expansão da argila, e superfície de fricção (*slickensides*) (Figura 52b).

As classes GXTa e GJ, juntas, abrangem uma área de 59,46 km² (correspondente a 25,68%). Nessa unidade os solos encontrados são predominantemente GLEISSOLOS com variações no 2º nível categórico, sendo: tiomórfico, háplico, sálico e melânico. Apresentam mosqueado ou variegado, podendo admitir qualquer matizes e valores, desde que o croma seja menor ou igual a 2. A figura 53 ilustra alguns perfis de GLEISSOLO coletados na área. Esses solos são compreendidos como minerais, hidromórficos, com redução e ferro e prevalência de estado reduzido, devido à estagnação da água por influência do lençol freático, o horizonte glei dos perfis estudados são de horizontes C.

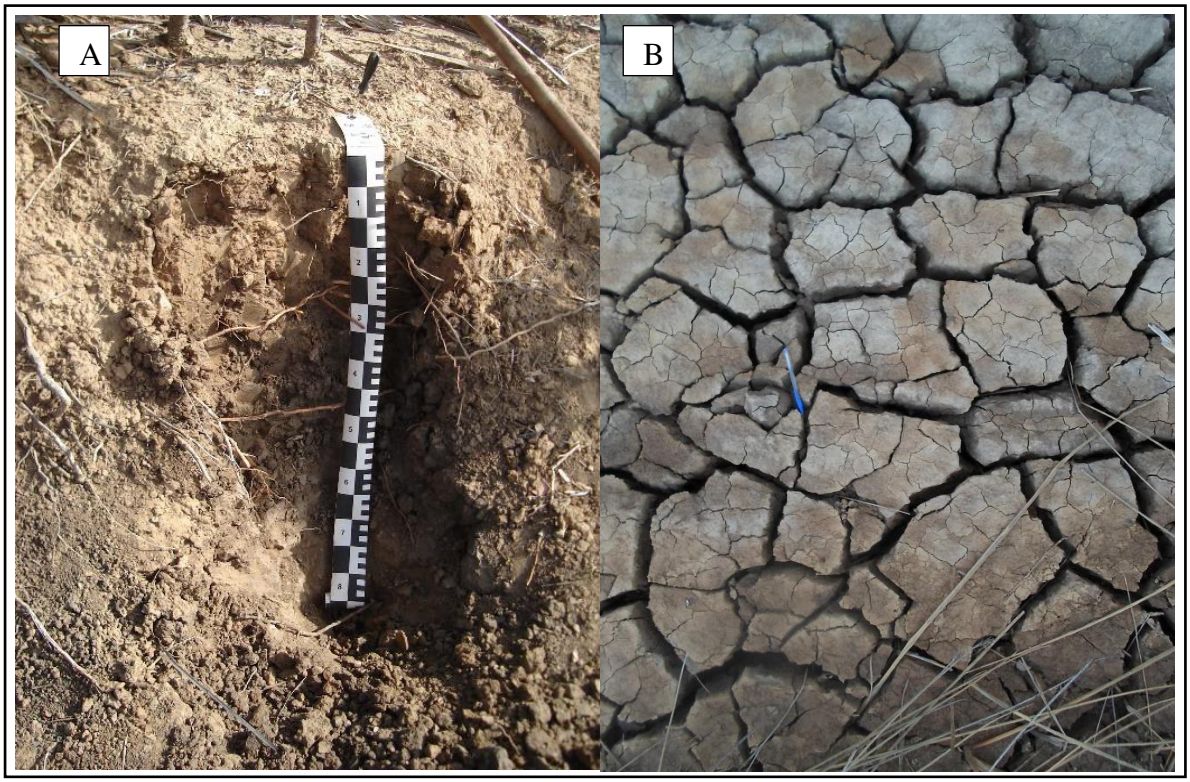


Figura 52 – Perfis representativos de SN (A) e VX (B); (A) P29; (B) P38

Fonte: pesquisa direta.

As classes DM – Dunas móveis e P – Cordão arenoso e praia estenderam-se por 27,59 km² (11,91%) e 37,99 km³ (16,41%) respectivamente. As Dunas móveis compreendem as grandes massas individuais de areias em movimento, constituídas de dunas eólicas simples e/ou compostas, além de grandes faixas de areia alongadas próximo a linha de praia. Os cordões arenosos e praia são acumulações de areias que ficam entre a base das ondas modais e o limite do espraiamento e que são depositadas principalmente pelas ondas, mas também são influenciadas pelas marés e pela topografia local.

Com relação à acurácia do mapeamento, a validação por meio de matriz de erros, expressa na tabela 15, obteve Exatidão Global de 61,90%, maior em relação ao mapa anterior. O mesmo acontece com o Kappa, que para este mapa alcançou 0,52, de concordância moderada.

As classes que apresentam bons resultados para exatidão do produtor (%) são GJ (100%), SNo (66,6%) e P (60%). Valores de 50% de exatidão foram alcançados em GXTa, RQo1 e DM. Quanto à exatidão do usuário ou “confiança”, os melhores desempenhos foram verificados nas classes GJ (100%) e P (75%) e os piores para os RQo1 (25%) e SNo (20%).



Figura 53 – GLEISSOLOS do Delta do Parnaíba;
(A) mosqueado do GJ P33; (B) P13; (C) Coleta do P15; (D) P33

Fonte: pesquisa direta.

Tabela 15 – Matriz de confusão do conjunto de dados 8 (pontos classificados em campo)

	GXTa	GJ	RQo1	SNo	DM	P	TOTAL
GXTa	2	0	1	1	0	0	**4**
GJ	0	2	0	0	0	0	**2**
RQo1	1	0	1	1	0	1	**4**
SNo	1	0	0	4	0	0	**5**
DM	0	0	0	0	1	1	**2**
P	0	0	0	0	1	3	**4**
TOTAL	**4**	**2**	**2**	**6**	**2**	**5**	**21**

Fonte: elaborado pelo autor.

O mapa gerado à partir da matriz de dados 12 está representado na figura 54. Com base na imagem, verifica-se que a classe de maior abrangência para a área de estudo foi a AR – Solos de textura arenosa, com cerca de 90,31 km² (39%).

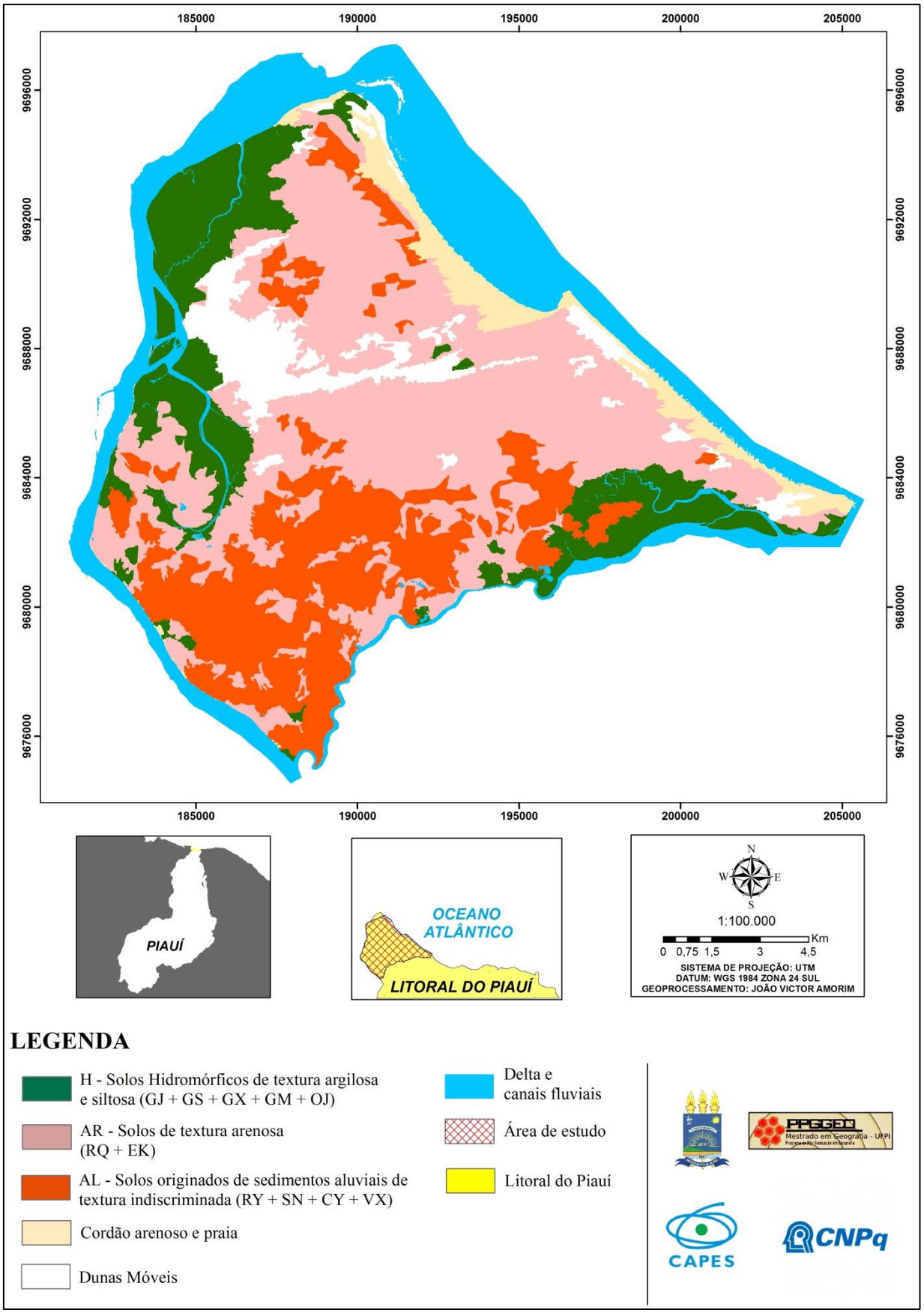


Figura 54 – Mapa pedológico digital gerado a partir da matriz de dados 12

Fonte: elaborado pelo autor.

A segunda classe de maior abrangência foi a dos solos originados de sedimentos aluviais, de textura indiscriminada – AL, com 60,24 km², correspondendo a 26% da área.

A classe H – solos hidromórficos de textura argilosa, siltosa e média, representa 19,4% da área (aproximadamente 44,91 km²). Esses solos, em sua maioria, são representativos das áreas de planície fluvio-marinha (áreas de florestas de mangue) que sofrem forte influência do rio Parnaíba e seu tributário, rio Igaraçu, e do Oceano Atlântico (Figura 55). As classes DM – Dunas móveis e P – Cordão arenoso e praia estenderam-se por 22,99 km² (9,9%) e 13 km³ (5,6%) respectivamente. Nessas duas classes existe a ocorrência de materiais areno-quartzosos não consolidados (Figura 56).

Com relação à acurácia do mapeamento, quando validado por meio da matriz de erros (Tabela 16), a exatidão global foi de 67% e o índice Kappa de 0.57, indicando boa concordância segundo critérios de Landis e Koch (1977).

Tabela 16 – Matriz de confusão do conjunto de dados 12 (pontos classificados em campo)

	H	**AR**	**AL**	**DM**	**P**	**TOTAL**
H	3	0	0	0	0	3
AR	0	2	3	0	0	5
AL	0	1	6	0	0	7
DM	0	1	0	1	0	2
P	0	1	0	1	2	4
TOTAL	3	5	9	2	2	**21**

Fonte: elaborado pelo autor.

A classe H – Solos hidromórficos apresentou valor 100 para a exatidão do ponto de vista do produtor (%), isso significa que todos os pontos classificados em campo como pertencentes a essa classe foram preditos corretamente. O mesmo valor foi alcançado para a exatidão do usuário, que mede a probabilidade de um ponto no mapa representar a verdade de campo, também podendo ser chamado de "confiança", o que indica que para essa classe a confiabilidade é alta.

Já para a classe AR – Solos de textura arenosa, a acurácia do produtor foi de apenas 40%, indicando que apenas dois dos cinco pontos coletados em campo e utilizados para a validação foram preditos corretamente. Na exatidão do usuário o valor manteve-se o mesmo, indicando que essa classe apresentou baixa confiabilidade.



Figura 55 – Representativo da paisagem da classe H – Solos hidromórficos

Fonte: pesquisa direta.



Figura 56 – Representativo de Dunas Móveis no município de Ilha Grande – PI

Fonte: pesquisa direta.

Para a mancha AL – Solos oriundos de sedimentos aluviais, a exatidão do produtor foi 67% e do usuário de 86%, uma vez que mais da metade dos pontos foram classificados corretamente, indicando boa confiabilidade do mapeamento.

As classes DM e P apresentaram exatidão do produtor de 50 e 100%, respectivamente, e do usuário de 50 e 50%, respectivamente. Para a classe P o resultado mostra total acerto na classificação dos pontos, porém confiabilidade moderada. Já para DM os valores indicam frequência média de acerto na classificação dos pontos e também mostram uma confiabilidade moderada. No entanto, vale recapitular que os pontos classificados fora da legenda P foram designados como DM e AR, e o ponto DM foi colocado como P, o que indica certa coerência, levando-se em consideração o tipo de material originário semelhante.

De maneira geral, houve uma boa concordância no que diz respeito à acurácia do mapa digital. Houve uma limitação metodológica no que diz respeito à quantidade de pontos por classe para validação dos mapas. Algumas classes possuem apenas dois ou três exemplos de referência, e se há muito poucas observações então há também probabilidade de se obter bons resultados por acaso. Sendo assim, é difícil gerar uma matriz de erro que seja representativa para todas as classes preditas pelo mapa.

Além disso, é notada uma discordância entre a acurácia determinada pelo modelo preditivo e a acurácia dos mapa gerado a partir das predições. O modelo do algoritmo J48 alcançou 41,8%, 56,1% e 75,5% de acurácia quando analisadas as matrizes de dados 4, 8 e 12, respectivamente. A partir destes modelos foram gerados os mapas que, quando confrontados aos pontos de referência em campo por meio da matriz de erros, obtiveram proporção de amostras corretamente classificadas de 42,87%, 61,90% e 67%.

A acurácia do modelo depende da forma com que as matrizes de dados foram elaboradas, dos procedimentos de pré-processamento nelas empregados e da capacidade do algoritmo em interpretar, extrair os padrões e associá-los as diferentes classes de solo (DIAS, 2015). Quanto à elaboração das matrizes de dado, o potencial de uso dos dados do SRTM, para a área, é muito pequeno, em função principalmente de imperfeições que reduzem a exatidão de todo o conjunto de dados. O pacote de variáveis derivado do sensor remoto mostra-se o mais adequado.

Com o propósito de uma comparação mais efetiva entre os métodos de mapeamento, também foi realizada uma validação a partir do mapa tradicional pré-existente de Cabral (2018) para os mapas gerados pelas matrizes 8 e 12. Essas comparações foram feitas segundo os seguintes métodos: Exatidão Global, índice Kappa e exatidão do ponto de vista de usuário e produtor.

Para o mapa gerado a partir da matriz de dados 8, a Exatidão Global foi de 55%, e o Kappa chegou a 0,40, conforme a matriz de erros expressa na tabela 17. Houve a necessidade de compatibilizar a legenda do mapa digital para efetiva comparação com o mapa tradicional, onde agrupou-se as classes DM e P, correspondentes à classe RQo2.

Tabela 17 – Matriz de confusão da combinação entre mapa do conjunto 8 e mapa tradicional

		GXTa	GJ	RQo1	SNo	DM + P	TOTAL
MAPA PRÉ-EXISTENTE Cabral (2018)	GXTa	12,13	1,66	7,12	7,27	0,61	28,79
	GJ	12,13	1,66	7,12	7,27	0,51	28,69
	RQo1	5,83	0,36	57,76	5,27	10,35	79,57
	SNo	9,63	0,08	15,23	26,27	3,63	54,84
	ROo2	0,52	0,72	5,28	0,34	24,45	31,32
TOTAL		40,24	4,47	92,52	46,42	39,55	**223,20**

Fonte: elaborado pelo autor.

No que se refere à exatidão do produtor (%), as classes que obtiveram melhores resultados foram RQo1 (62,43%), DM + P (61,82%) e SNo (56,59%). Já para exatidão do usuário a classe DM + P obteve 78,06%, seguida por RQo1 (72,59%). O valor mais baixo foi estabelecido na classe GJ, com apenas 5,78% de acerto. Ao comparar os dois métodos de avaliação e acurácia, verifica-se que a validação pelos pontos classificados em campo apresentou resultados superiores aos comparados à sobreposição com o mapa tradicional, elevando a qualidade da classificação de ruim a razoável, de acordo com os critérios de Landis e Koch (1977).

Cabe destacar que os valores dessas exatidões são referentes apenas aos valores das somas da área (km²) de cada classe, em relação à área do mapa corretamente classificado.

O mapa gerado com base na matriz 12, quando validado pelo mapa tradicional, apresentou Exatidão Global de 72,64% e Kappa de 0,61, indicando boa concordância na classificação. A tabela 18 ilustra a matriz de erros.

No que diz respeito às avaliações do produtor e usuário (%) todas as classes apresentam exatidão do produtor acima de 50%. Para avaliação do produtor a classe H apresentou um nível de acerto de 93,95%. Já para a "confiança", a classe AR foi a de melhor classificação, alcançando 81,60%. Quando comparada a acurácia com os pontos classificados em campo, percebe-se um pequeno ganho na qualidade do mapeamento.

Tabela 18 – Matriz de confusão da combinação entre mapa do conjunto 12 e mapa tradicional

		H	AR	AL	DM+P	TOTAL
MAPA PRE-EXISTENTE Cabral (2018)	**H**	37,16	16,64	7,43	0,47	61,70
	AR	0,77	64,93	9,18	4,69	79,57
	AL	0,80	14,26	38,91	0,88	54,84
	DM	0,83	5,65	0,63	24,21	31,32
TOTAL		39,55	101,47	56,14	30,25	**227,42**

Fonte: elaborado pelo autor.

As matrizes de erro dos mapas com classes de solo em unidades de mapeamento mostram que a Exatidão Global e o Kappa são sempre maiores em comparação com os mapas de classificação mais detalhada que utilizam o mesmo conjunto de variáveis preditivas.

Dados de sensoriamento remoto orbital e atributos topográficos de MDEs são amplamente utilizados na compreensão das relações espaciais e temporais, entre classes de solos e componentes da paisagem (McBRATNEY et al., 2003). O estudo das relações solo-paisagem através de técnicas de geoprocessamento utiliza variáveis quantitativas representadas pelos modelos numéricos contínuos das componentes da superfície.

A interpretação destas informações em geoprocessamento é fundamentada no agrupamento de dados com padrões semelhantes. Com base nos resultados os índices derivados das imagens podem aprimorar o desempenho da classificação supervisionada devido à contribuição de informações espaciais relativas aos aspectos da paisagem.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar de fortemente defendidos na literatura, os modelos gerados a partir das variáveis do relevo não apresentaram resultados satisfatórios para o MDS do Delta do Parnaíba, provavelmente pelo nível de detalhamento dos modelos existentes, sendo os derivados de bandas espectrais de sensores orbitais essenciais para o entendimento da distribuição dos solos na paisagem e que se mostraram mais efetivos para a classificação.

Os atributos: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada, *Clay Minerals*, banda 2, banda 6 e banda 10 tiveram uma melhor relação com os tipos de solos encontrados em regiões de planície flúvio-marinha, como os solos hidromórficos do tipo Gleissolos e Organossolos. Para a identificação das áreas de material areno-quartzoso, as variáveis mais efetivas foram: *Iron Oxide,* Índice de Umidade da Diferença Normalizada e banda 4, juntamente com as varáveis geomorfométricas que auxiliaram na diferenciação dos campos de Dunas móveis.

No que diz respeito às matrizes de dados, além das matrizes elaboradas para associações da paisagem, verificou-se uma maior proporção de observações corretamente classificadas para os modelos com unidades de mapeamento que com classes de solo em segundo nível categórico. Cabe enfatizar que para as unidades de mapeamento, o aumento foi considerado grande o suficiente para justificar ganho de detalhe com relação ao mapa em segundo nível.

Para todas as legendas de classificação e algoritmos testados, as matrizes que apresentaram os melhores resultados foram aquelas que levaram em consideração todos os parâmetros preditivos. Apesar de números de concordância baixos, quando rodados individualmente, unidos foram capazes de se complementar, ajudando o algoritmo classificador a reduzir erros. Nessa perspectiva, conclui-se que quanto maior a frequência de variáveis preditivas, melhor será a resposta da classificação.

Ressalta-se também que o algoritmo classificador utilizado, J48 (Árvore de Decisão), apresentou resultados satisfatórios na escala empregada, demonstrando grande potencial de apoio à cartografia pedológica.

O trabalho de campo foi essencial para entender a paisagem local, bem como visualizar os limites entre os compartimentos pedológicos. Foi possível também validar os mapas de Pedometria, que se mostraram coerentes com a realidade *in loco*, bem como os outros trabalhos consultados. A metodologia selecionada para a pesquisa mostrou-se adequada alcançando resultados positivos.

O mapeamento pedológico gerado, ainda que preditivo, possui potencial para aplicações em estudos de fragilidade e vulnerabilidade ambiental, riscos de erosão, além de subsídio de análises para planejamento e gestão ambiental do território do Delta do Parnaíba, desde que as metodologias empregadas no presente estudo sejam testadas de forma mais frequente e constantemente aperfeiçoadas, afim de melhorar cada vez mais os resultados.

Por fim, este trabalho evidencia que a utilização de parâmetros advindos de MDEs e sensores remotos orbitais, em uma abordagem por Árvores de Decisão, podem contribuir indubitavelmente para tornar as pesquisas com mapeamentos de solos no Brasil mais quantitativas e confiáveis, auxiliando os profissionais no entendimento das relações solo-paisagem.

BIBLIOGRAFIA CITADA:

AGLIO, M. L. D.; DART, R. O.; SOUZA, J. S.; MENDONÇA, L. R. **Níveis de levantamento de solos no Brasil.** Rio de Janeiro, 2015.

AMORIM, João Victor Alves. **Uso e cobertura das terras e áreas potenciais para o turismo no Delta do Parnaíba – Piauí.** 76f. Monografia (Licenciatura em Geografia) – Coordenação do Curso de Geografia, Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2017.

AQUINO, Renê Pedro de; VALLADARES, Gustavo Souza; COELHO, Ricardo Marques; GOMES, Joylson Fernandes Vidal de Lima; ASSIS, Ana Carolina Cunha de.; CABRAL, Léya Jéssyka Rodrigues Silva. Levantamento Pedológico de Reconhecimento de Alta Intensidade em Área no Sertão Central do Ceará. In: AQUINO, Cláudia Maria Sabóia de.; FAÇANHA, Antonio Cardoso; CARDOSO, Josenete Assunção; SILVA, Silvana de Sousa (orgs). **Geografia:** o regional e o geoambiental em debate v.1, Teresina : EDUFPI, 2015.

ARAÚJO, M. A. R. **Unidades de Conservação no Brasil e da república à gestão de classe mundial**. Belo Horizonte: SEGRAC, 2007.

ARAÚJO, M. V.; FREIRE, G. S. S. Utilização de SIG nos estudos ambientais do estuário do Rio Acaraú – Ceará. **Geonomos,** v. 15, n. 02, p. 09-19, 2007.

ARAÚJO T.C.M.; SEOANE, J.C.S.; COUTINHO, P.N. Geomorfologia da Plataforma continental de Pernambuco. In: LEÇA, E.E.; NEUMAN, N.; LEITÃO, S.; COSTA, M.F. (Ed.) **Oceanografia** – Um cenário tropical, Recife. Ed. Bagaço, 2004, p. 39-57.

ARRUDA, Gustavo Pais de. **Estratégias de mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais baseadas na relação solo-paisagem.** 103f. Dissertação (Mestrado – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"), Piracicaba, 2012.

ARRUDA, Gustavo Pais de; DEMATTÊ, José Alexandre M.; CHAGAS, César da Silva. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v. 37, n. 2, p. 327-338, mar./abr., 2013.

BARSI, J. A.; LEE, K.; KVARAN, G.; MARKHAM, B. L.; PEDELTY, J. A. The Spectral Response of the Landsat-8 Operational Land Imager. **Remote Sensing**, 6(10), 10232-10251; https://doi.org/10.3390/rs61010232 , 2014.

BERTALANFFY, Ludwig Von. **Teoria geral dos sistemas**. 2. ed. Petropolis : Vozes, 1975.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global – esboço metodológico. **Cadernos de Ciências da Terra**, São Paulo, n. 13, p. 1- 27, 1972.

BIRD, E. C. F. **Coasts:** An Introduction to Coastal Geomorphology. New York: Blackwell, 1984.

BÖNISCH, S.; ASSAD, M. L. Lopes; MONTEIRO A. M. V.; CÂMARA, G. Representação e propagação de incertezas em dados de solo. II - Atributos numéricos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v. 28 n.1, p. 33-47, jan./fev., 2004.

BRASIL. Resolução CIRM N° 01, de 21 de novembro de 1990. Aprova o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC). Comissão Interministerial para Recursos do Mar, Brasília, 1988. Disponível em: <www.ipef.br/legislacao/bdlegislacao/arquivos/17576.rtf> Acesso em: 12 jan. 2019.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento de Meteorologia. **Normais Climatológicas (1981– 2010)**. Brasília, DF, 2018.

BRASIL. MINISTERIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa de Zoneamento Ecológico-Econômico do Baixo Parnaíba:** Subsídios Técnicos – Relatório Final. Brasília: s.e., 2002.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Pedologia.** 3. ed. Rio de Janeiro : IBGE, 2015.

BRENNER, V. C.; GUASSELLI, L. A. Índice de diferença normalizada da água (NDWI) para identificação de meandros ativos no leito do canal do rio Gravataí/RS – Brasil. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR,** João Pessoa-PB, 2015, p. 3693-3699.

CABRAL, L. J. R. S. **Levantamento pedológico da Planície do Delta do Parnaíba, PI.** 138f. Dissertação (Mestrado em Geografia – Universidade Federal do Piauí), Teresina, 2018.

CAMPBELL, J. B. **Introduction to remote sensing**. New York: The Guilford Press, 1987.

CARVALHO, C.C.N. Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.1, p.46-55, 2009.

CARVALHO, Márcia Eliane Silva; FONTES, Arasy Losano. A Carcinicultura no Espaço Litorâneo Sergipano. **Revista da Fapese**, v.3, n. 1, p. 87-112, jan./jun. 2007.

CARVALHO JUNIOR, W. de. et al. Digital soilscape mapping of tropical hillslope areas by neural networks. **Scientia Agricola**, v.68, n.6, p.691-696, 2011.

CARVALHO JUNIOR, W. de. et al. Método do hipercubo latino condicionado para a amostragem de solos na presença de covariáveis ambientais visando o mapeamento digital de solos. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v.38, n.2, p.386-396, 2014.

CAVALCANTI, A. P. B. **Impactos e condições ambientais da zona costeira do Estado do Piauí**. Rio Claro: UNESP, 2000.356p. Tese (Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Rio Claro, 2000.
CAVALCANTI, Agostinho Paula Brito. **Caracterização e análise das unidades geoambientais na planície deltaica do rio Parnaíba / PI**. (Dissertação) Metrado. Rio Claro: UNESP / em Geografia UNESP/Associação de Geografia Teorética AGETEO, 1996.

CAVALCANTI, Agostinho Paula Brito; CAMARGO, José Carlos Godoy. Impactos e condições ambientais da zona costeira do estado do Piauí. In: GERARDI, Lucia Helena de Oliveira; MENDES, Iandara Alves (Orgs). **Do Natural, do Social e de suas interações: visões geográficas**, Rio Claro : Programa de Pós-Graduação em Geografia – UNESP ; Associação de Geografia Teorética – AGETEO, 2002

CEDDIA, M. B. Mapeamento de solos no nosso tempo. **Pedometria,** Brasil, p. 2 - 9, 29 out. 2013.

CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná : Curitiba, 2003.

CHAGAS, C. S. **Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros**. 223f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

CHAGAS, C.S.; FERNANDES FILHO, E.I.; VIEIRA, C.A.O., CARVALHO JUNIOR, W. 2007. Utilização de redes neurais artificiais para predição de classes de solo em uma bacia hidrográfica no Domínio do Mar de Morros. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. **Anais...** p. 2421 – 2428.

CHRISTOFOLETTI, Antônio. **Geomorfologia Fluvial** – Volume 1: o canal fluvial. São Paulo : Edgard Blücher, 1981.

COELHO, F.F.; GIASSON, E. Comparação de métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural,** v.40, n.10, p.2099-2106, 2010.

COELHO, F. F. **Comparação de métodos de mapeamento digital de solos através de variáveis geomorfométricas e sistemas de informações geográficas**. 80f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Programa de pós-graduação em Sensoriamento Remoto. Centro estadual de pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

COHEN, J. **A coefficient of agreement for nominal scales**. Educational and Psychological Measurement, v.20, n. 1, p. 37 - 46, 1960.

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

CORRÊA, Wanderson. Barreto; FONTENELLE ,Thiago. Henriques. Processo de ocupação da zona costeira: Ecoresorts e Gerenciamento Costeiro do Meso Compartimento Cabo Frio – Cabo Búzios, Litoral do Rio de Janeiro. IN: Encontro nacional dos geógrafos. **Anais...**Porto alegre, 2010. p. 1-13.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Mapa geológico do estado do Piauí.** Teresina: CPRM, 2006. Escala 1:1.000.000

CRIVELENTI, R.C. et al. Mineração de dados para a inferência de relações solo-paisagem em mapeamentos digitais de solo. **Revista Agropecuária Brasileira**, v.44, n.12, p.1707-1715, 2009.

DALMOLIN, Ricardo Simão Diniz; TEN CATEN, Alexandre. **Aplicações da pedometria no manejo e conservação de solos** (palestra). In: SIMPÓSIO MINEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 3, Viçosa, MG, 2015.

DIAS, J.; SANTOS, L. J. C. A paisagem e o geossistema como possibilidade de leitura da expressão do espaço sócio-ambiental rural. **Revista Franco-Brasileira de Geografia (CONFINS).,** v.1, n.1, 2007. Disponível em: <http://journals.openedition.org/confins/10?lang=pt> Acesso em: 13 dez. 2017.

DIAS, L. M.; COELHO, R. M.; VALLADARES, G. S.; CUNHA DE ASSIS, A. C.; FERREIRA, E. P.; SILVA, R. C. Predição de classes de solo por mineração de dados em área da bacia sedimentar do São Francisco. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.51, n.9, p.1396-1404, set. 2016.

DIAS, Laura Milani da. **Predição de classes de solo por atributos do meio físico e de sensoriamento remoto em área da bacia sedimentar do São Francisco**. 127f. Dissertação (Mestrado – Agricultura Tropical de Subtropical) Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, 2015.

DIAS, João. Alveirinho. Evolução da Zona Costeira Portuguesa: Forçamentos Antrópicos e Naturais. **Revista Tourism & Management Studies**, Portugal, n.1. p.7-27, 2005.

DOKUCHAEV, V.V. **Schematic Map of Humus Content in the Upper Horizon of Soils of the Chernozemic Zone:** Supplement to the Book "Russian Chernozem,", 1883. (em russo).

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B. de; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA, J. H. M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos.** Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

ELNAGGAR, A. A. **Development of Predictive Mapping Techniques for Soil Survey and Salinity Mapping.** Thesis (PhD) - Oregon State University, 2007.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Procedimentos normativos para levantamentos pedológicos**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1995.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos.** Rio de Janeiro, 1979.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 3. ed. Brasília, 2013.

ESPINDOLA, C. R. **Retrospectiva crítica sobre a pedologia**, Um repasse bibliográfico, Campinas: Editora da Unicamp, 2008.

ESRI. Environmental Systems Research Institute. **ArcGis: ArcMap versão 10.2,** 2013.

FERREIRA, Antonio Geraldo; MELLO, Namir Giovanni da Silva. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia,** v. 1, n. 1, p. 15-28, 2005.

FIGUEIREDO, S.R; GIASSON, E. Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no planalto médio do RS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo,** v.32, p.2779-2785, 2008.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em Sensoriamento Remoto.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

FLORENZANO, Tereza Gallotti. Sensoriamento Remoto para Geomorfologia. In. FLORENZANO, Tereza Gallotti (org). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FRANK, Eibe; HALL, Mark A.; WITTEN, Ian H. The WEKA Workbench. **Online Appendix for "Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques"**, Morgan Kaufmann, Fourth Edition, 2016.

FREIRE, N. C.F, PACHECO, A. P. Aspectos da detecção de áreas de risco à desertificação na região de Xingó. XII. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais...** Goiânia, Brasil, 2005.

FROTA, Jéssica Cristina Oliveira. **Potencial de expansão urbana na planície costeira do estado do Piauí**. 148f. Dissertação (Mestrado em Geografia – Universidade Federal do Piauí), Teresina, 2017.

FROTA, Jéssica Cristina Oliveira; AMORIM, João Victor Alves; VALLADARES, Gustavo Souza. Identificação e Análise Morfométrica das Bacias Litorâneas do estado do Piauí. In: AQUINO, Cláudia Maria Sabóia de; SANTOS, Francílio de Amorim dos; SILVA, Francisco Jonh Lennon Tavares da. (Org.). **Recursos Hídricos do estado do Piauí:** fundamentos de gestão e estudos de casos em bacias hidrográficas do centro-norte piauiense. 1. ed. Teresina: EDUFPI, 2017, p. 159-176.

FUNDAÇÃO CEPRO. **Macrozoneamento Costeiro do Estado do Piaui: Relatório Geoambiental e Socioeconômico**. Teresina: s.e, 1996.

FUNDAÇÃO RIO PARNAÍBA – FURPA. **Macrozoneamento Costeiro do Estado do Piaui: Relatório Geoambiental e Socioeconômico**. Teresina: s.e, 1995.

GAO, B.C. NDWI – A Normalized Difference Water Index for remote sensing of vegetation liquid water from space. **Remote Sensing of Environment,** v.58, p.257-266, 1996.

GEBBERS, R.; ADAMCHUK, V. I. Precision agriculture and food security. **Science**, v. 327, p. 828-831, 2010.

GIASSON, E; SARMENTO, C. E.; WEBER, E.; FLORES, C. A.; HASENACK, H. Decision trees for digital soil mapping on subtropical basaltic steeplands. **Scientia Agrícola**, v.68, n. 2,p.167-174, 2011.

GIASSON, E. et al. Digital soil mapping using multiple logistic regression on terrain parameters in southern Brazil. **Scientia Agricola**, v.63, p.262-268, 2006.

GOMES, Edvânia Torres Aguiar. **Recortes de Paisagens na cidade de Recife: uma abordagem geográfica.** 300f. Tese (Doutorado em Geografia). Universidade de São Paulo – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, São Paulo, 1997.

GOMES, Fernando. Veloso. A Gestão da Zona Costeira Portuguesa. **Revista da Gestão Costeira Integrada** v.7, n.2, p.83-95, 2007.

GOMES, L. C.; FARIA, R. M.; SOUZA, E.; VELOSO, G. V.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES FILHO, E. I. Modelling and mapping soil organic carbon stocks in Brazil, **Geoderma,** v.340, p. 337-350, 2019.

GRUBER, N.L.S; BARBOSA, E.G; NICOLODI, J.L. Geografia dos sistemas costeiros e oceanográficos: Subsídios para a gestão integrada da zona costeira. **Revista Gravel.** Porto Alegre, n.1, p. 81-89, 2003.

GUERRA, A.J.T.; MARÇAL, M. dos S. **Geomorfologia Ambiental.** 4. ed. – Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012.

GUZZI, Anderson. **Biodiversidade do Delta do Parnaíba:** litoral piauiense. Parnaíba : EDUFPI, 2012.

HALL, M. A. et al. **The WEKA Data Mining Software: Na Update.** SIGKDD Explorations, v. 11, n. 1, p. 10 – 18, 2009.

HENGL, T. **Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches.** 200f. (Tese de Doutorado) Enschede, Wageningen University, 2003.

HENGL, T.; ROSSITER, D.G. Supervised landform classification to enhance and replace photo-interpretation in semi-detailed soil survey. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p.1810-1822, 2003.

HÖFIG, P.; GIASSON, E.; VENDRAME, P. R. S. Mapeamento digital de solos com base na extrapolação de mapas entre áreas fisiograficamente semelhantes. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.49, n.12, p.958-966, dez. 2014

HÖFIG, Pedro. **Mapeamento Digital de Solos e o Mapa de Solos como ferramenta para classificação de aptidão de uso das terras.** 90f.Dissertação (Mestrado em Agronomia – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Porto Alegre, 2014.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). **Manual de Técnico de Pedologia**. Série Manuais Técnicos em Geociências. 3. ed. Manuais Técnicos em Geociências, n. 4, Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Métodos de Analise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agronômico de Campinas.** Campinas, Instituto Agronômico, 2009. (Boletim técnico, 106, Edição revista e atualizada)

JENNY, H. **Factors of soil formation; a system of quantitative pedology.** New York: McGraw-Hill, 1941. 281p.

JI, L.; ZHANG, L.; WYLIE, B. Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**. v. 75, n. 11, November, 2009, p.1307-1317.

KÄMPF, N.; CURI, N. Conceito de solo e sua evolução histórica. In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia:** fundamentos. Viçosa : SBCS, 2015.

KANELLOPOULOS, I.; WILKINSON, G.G. Strategies and best pratice for neural network image classification. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, n.4, p. 711 – 725, 1997.

KER, J. C.; CURI, N.; NOVAIS, R. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia:** solos dos biomas brasileiros. Viçosa : SBCS, 2017.

KHEIR, R.B. et al. Spatial soil zinc content distribution from terrain parameters: A GIS-based decision-tree model in Lebanon. **Environmental Pollution**, v.158, n.2, p.520-528, 2010.

LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A. B. Spatial soil information systems and spatial soil inference systems: perspectives for digital soil mapping. In: LAGACHERIE, P.; McBRATNEY,A. B.; VOLTZ, M. **Digital soil mapping:** an introductory perspective. Amsterdam: Elsevier, 2007, p. 3-22.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

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

LATINI, Karina Monnerat; ARAÚJO, Andréa Fernandes. A importância do trabalho de campo no planejamento curricular da geografia para educação básica: um exemplo das escolas do município de Nova Friburgo, 2009. ENCONTRO NACIONAL DE PRÁTICA DE ENSINO EM GEOGRAFIA (ENPEG), 10, Porto Alegre, RS. In: **Anais...** Porto Alegre, RS, 2009. Disponível em: < http://www.agb.org.br/XENPEG/artigos/Poster/P%20(3).pdf> Acesso em: 13 Jan. 2016.

LEMOS, Raimundo Costa de; SANTOS, Raphael David dos. **Manual de Descrição de Coleta de Solo no Campo,** 3. ed, Campinas : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.

LEPSCH, Igo F. **19 Lições de Pedologia.** São Paulo : Oficina de Textos, 2011.

LEPSCH, Igo. F. **Formação e Conservação dos Solos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MacMILLAN, R. A. Experiences with Applied DSM: Protocol, Availability, Quality and Capacity Building. In.: HARTEMINK, A.E.; McBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. DE L. (Ed.), **Digital Soil Mapping with Limited Data.** New York: Springer, 2008, p.113- 135

MAZZER,A.M; DILLENBURG, S.R; SOUZA, C.R de. Proposta de método para análise de vulnerabilidade à erosão costeira no sudeste da ilha de Santa Catarina, Brasil. **Revista Brasileira de Geociência**, São Paulo, v.38, n.2, p. 279-294, jun. 2008.

McBRANTNEY. A. B.; MINASNY, B. **Pedometria:** motivação, história e aplicações (palestra). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34, Florianópolis, SC, 2013.

McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soilmapping. **Geoderma**, v. 117, p. 3-52, 2003.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A.; BISHOP, T. F. A.; DUNBAR, M. S.; SHATAR, T. M. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. **Geoderma**, v. 97, n. 3-4, p.293-327, 2000.

McFEETERS, S.K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International Journal of Remote Sensing,** v.17, n.7, p.1425-1432, 1996.

MEIRELES, A. J. de A. **Geomorfologia costeira:** funções ambientais e sociais. Fortaleza : Edições UFC, 2012.

MENDONÇA, F.; VENTURI, L. A. B. **Geografia e metodologia científica da problemática geral as especificidades da geografia física**. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 2., GEOSUL, Florianópolis, v. 14, n. 27, p. 63-70, 1998.

MENESES, Paulo R.; MADEIRA NETTO, J. da S. **Sensoriamento remoto:** reflectância dos alvos naturais.Editora Universidade de Brasilia; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2001.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia:** noções básicas e climas do Brasil. São Paulo : Oficina de Textos, 2007.

MILLER, J.; FRANKLIN, J. Modeling the distribution of four vegetation alliances using generalized linear models and classification trees with spatial dependence. **Ecological Modeling**, v.157, p. 227 - 247, 2001.

MOORE, I. D.; GESSLER, P. E.; NIELSEN, G. A.; PETERSON G. A. Soil attribute prediction using terrain analysis. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 57, p. 443 - 452, 1993.

MORAES, D. A. C.; SARTORI, A. A. C.; HOLLER, W. A.; SPADOTTO, C. A.; MARTINHO, P. R. R.; ZIMBACK, C. R. L. Uso da banda termal do satélite LANDSAT-5 e técnicas de geoestatística na estimativa da degradação da Atrazina no solo da Área de Proteção Ambiental de Tejupá. Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias, 3. In: **Anais...** Botucatu, SP, 2013. Disponível em: < http://www.bibliotekevirtual.org/simposios/SGEA/SGEA-2013/48.pdf> Acesso em: 13 abr. 2018.

MORAES, A. C.R. **Contribuições para a gestão da zona costeira do Brasil**: elementos para uma geografia do litoral brasileiro. São Paulo: Annablume, 2007.

MOREIRA, A. A.; SOARES, V. P.; GLERIANI, J. M.; RIBEIRO, C. A. A. S. **Utilização de algoritmos de classificação para o mapeamento do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do ribeirão São Bartolomeu, Viçosa-MG, a partir de uma imagem do sensor IKONOS II.** XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada - A Geografia Física Aplicada e as dinâmicas de apropriação da natureza, Viçosa (MG), 2009.

MOREIRA, F. R da S. **Uso e avaliação de técnicas de integração e análise espacial de dados em pesquisa mineral aplicadas ao Planalto de Poços de Caldas.** INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais, 2001.

MOREIRA, Ruy. Conceitos, Categorias e Princípios Lógicos para o Método e o Ensino da Geografia. **Pensar e ser em geografia**: Ensaios de história, epistemologia e ontologia do espaço geográfico. Paulo: Contexto, 2007. p. 105-118.

MUEHE, D. Critérios morfodinâmicos para o estabelecimento de limites da orla costeira para fins de gestão. **Revista Brasileira de Geomorfologia,** [s.l.], n.1, p. 35-44, 2001.

MUEHE, D. O litoral brasileiro e sua compartimentação. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Org.). **Geomorfologia do Brasil.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998, p. 273-349.

MUNSELL COLOR COMPANY. **Munsell soil-color charts**, 2009.

MYANAKI, Jacqueline. **A paisagem no ensino de Geografia:** uma estratégia didática à partir da arte. 155f. Dissertação (Mestrado em Geografia – Programa de Pós-graduação em Geografia Física), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

NASA (National Aeronautics and Space Administration). **Landsat 8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Update.** 2014. Disponível em:< https://landsat.usgs.gov/landsat-update-volume-8-issue-2-2014#2a> Acesso em: 11 out 2018.

NASCIMENTO, F. R. do; SAMPAIO, J. L. F. Geografia física, geossistemas e estudos integrados da paisagem. **Revista da Casa da Geografia de Sobral**. Sobral, v.7, n.1, p. 167-179, 2005.

NEUMAN, Marina Rolim Bilich. **Mapeamento Digital de Solos no Distrito Federal.** 123f. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

NOLASCO-CARVALHO, Claudia C.; FRANCA-ROCHA, Washington; UCHOA, José M. Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.13, n.1, p.46-55, 2009.

NOWATZKI, Alexei. **Utilização de atributos topográficos no mapeamento preliminar de solos da bacia hidrográfica do rio Pequeno (Antonina/PR).** 113f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

NOWATZKI, Alexei; SANTOS, Leonardo José Cordeiro dos. Mapeamento digital de solos por pedometria com base em atributos topográficos da bacia hidrográfica do rio Pequeno-Paraná. **RA'EGA,**n.1, v. 32, p. 185-211, 2014.

OLIVEIRA, Frederico. Fonseca. Galvão. **Aplicação das técnicas de geoprocessamento na análise dos impactos ambientais e na determinação da vulnerabilidade ambiental no litoral sul do Rio Grande do Norte.** 250f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Universidade Federal de São Paulo, Rio Claro, 2011.

PASSOS, Messias Modesto dos. **Paisagem e Meio Ambiente:** noroeste do Paraná. Maringá : Eduem, 2013.

PAULA, J. E. A. **Dinâmica morfológica da planície costeira do Estado do Piauí**: evolução, comportamento dos processos costeiros e a variação da linha de costa. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2013.

PINHEIRO, M. V. A;MOURA-FÉ, M. M; FREITAS, E. M. N; COSTA, A. Torres; AGUIAR, A. C. S; SOMBRA, Enio Tarsom Paiva. Dunas móveis: áreas de preservação permanente? **Revista Sociedade & Natureza**, Uberlândia, 25 (3): 595-607 set/dez/2013.

PONTIUS, R. G. Quantification Error versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, n.8, p. 1011 - 1016, 2000.

POLETTI, M. **Gerenciamento costeiro integrado: Proposta metodológica para a Paisagem Litorânea da Microbacia de Mariscal, Município de Bombinhas (SC / BR).** 499f. Tese (Doutorado)- Programa de pós-graduação em Ecologia e Recursos Naturais do Centro de Ciências Biológicas e da Saúde. Universidade Federal de São Carlos. São Paulo. 1997.

RADAMBRASIL. SA.23 São Luís e parte da folha SA 24 Fortaleza: **Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra.** Ministério das Minas e Energia. Levantamento de Recursos Naturais v. 25. Rio de Janeiro, 1981, 639 p.

RESENDE, M. et al. **Pedologia:** base para distinção de ambientes. 5 ed. Lavras, Universidade Federal de Lavras. 322 p. 2007.

RIVAS, Margareth P. (coord). **Macrozoneamento Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Parnaíba**. Rio de Janeiro: IBGE, 1996.

ROCHA, Glairton Cardoso. Relação entre atmosfera e a dinâmica costeira no litoral do Piauí. In: ROCHA, G. C.; SANTOS, F. A.; AQUINO, C. M. S. **Piauí do litoral ao meio-norte:** gestão, uso e conservação, v. 1, Teresina : EDUFPI, 2017, p. 57-76.

RODRIGUEZ, J. M. M.; SILVA, E. V. da. A classificação das paisagens a partir de uma visão geossistêmica. In: **Revista Mercator** , v. 1, n.1, 2002.

ROSA, A. S. **Funções de predição espacial de propriedades do solo.** Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria,Santa Maria, 2012.

RUIZ, L. F. C.; TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D. **ADtoSIG Software de Conversão.** Universidade Federal de Santa Maria, v.1, 2011.

SABINS, F. F. **Remote sensing: principles and interpolation.** 3nd ed. New York : W. H. Freeman and Company, 1997.

SANTOS FILHO, Francisco Soares; ALMEIDA JR. Eduardo Bezerra de; SOARES, Caio Jefiter dos Reis Santos e ZICKEL, Carmen Sílvia. Fisionomias das restingas do Delta do Parnaíba, Nordeste, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física** 03, 218-227, 2010.

SANTOS, Raphael David dos; SANTOS, Humberto Gonçalves dos; KER, João Carlos; ANJOS, Lúcia Helena Cunha dos; SHIMIZU, Sérgio Hideiti. **Manual de descrição e coleta de solo no campo.** 7. ed. Viçosa, MG : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015.

SANTOS, Jorge. LANDSAT-8: Download de imagens através dos sites Earth Explorer e GLOVIS. **Processamento Digital – Geotecnologias e Software Livre**, 2013. Disponível em: <http://www.processamentodigital.com.br/wp-content/uploads/2013/08/20130531_Landsat8_download_USGS.pdf> Acesso em: 04 dez. 2018.

SANTOS, H. G., et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 5. ed., rev. e ampl. − Brasília, DF : Embrapa, 2018.

SANTOS. G. C. dos. **Dinâmica da Paisagem Costeira da Coroa do Meio e Atalaia-Aracaju-Se**. Dissertação (Mestrado em Geografia - Curso de Pós Graduação em Geografia pela Universidade Federal de Sergipe), Aracajú, 2012.

SARMENTO, E. C. **Comparação entre quatro algoritmos de aprendizagem de máquina no mapeamento digital de solos no Vale dos Vinhedos, RS, Brasil.** (Tese de Doutorado).Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2010.

SCHOTT, J. R; GERACE, A; RAQUENO, N; IENTILUCCI E; RAQUENO, R. **"Chasing the TIRS ghosts: calibrating the Landsat 8 thermal bands ",** Proc. SPIE 9218, Earth Observing Systems XIX, 92181A (October 2, 2014); doi:10.1117/12.2063236; http://dx.doi.org/10.1117/12.2063236

SHORT, Andrew. D. – **Australian Beach Systems: nature and distribution.** Journal of Coastal Research, v. 22, nº 1, p 11–27, West Palm Beach, Florida, 2006.

SILVA, C.C. et al. **Mapeamento digital de classes de solo: aplicação de metodologia na folha Botucatu (SF-22-Z-B-VI-3) e validação de campo.** Dissertação. Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical. Campinas: Instituto Agronômico, 2012.

SILVA, André G. Aquino da; STATTEGGER, Karl; SCHWARZER, Klaus; VITAL, Helenice; HEISE, Bjorn. The Influence of Climatic Variations on River Delta Hydrodynamics

and Morphodynamics in the Parnaíba Delta, Brazil. **Journal of Coastal Research,** Coconut Creek, Florida, DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-14-00078.1, p. 1-10, 2014.

SILVA, André G. Aquino da.**The parnaíba river delta -** from modern hydro and morphodynamics to sea level change**.** Dissertation: ZurErlangung des Doktorgrades der Mathematisch-NaturwissenschaftlichenFakultät der Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 2015.

SILVA, Maurielle Felix da. **Mapeamento pedológico preditivo por Pedometria nas bacias hidrográficas dos rios Tagaçaba, Serra Negra e Guaraqueçaba - Guaraqueçaba (PR).** 150f. Dissertação (Mestrado em Geografia – Programa de Pós-Graduação em Geografia) Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

SILVA, Jéssica Ferreira da; LIMA, Cristiane dos Santos. Expansão urbana na zona costeira de São Luís – MA: a gestão ambiental inserida no gerenciamento costeiro. IN: IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. **Anais...**Salvador, 2013. p. 1-6.

SILVA, B. A.; MARTINS, V. M.; HAYAWAKA, E. H.; MACEDO, R. S. Mapeamento Digital de Solos e os atributos topográficos das vertentes no alto curso da Sub-Bacia hidrográfica do Córrego Quatro Pontes, PR–Brasil, **Revista Brasileira de Geomorfologia,**v. 19, n. 4, 2018.

SILVA, J. B; CAVALCANTE, T. C. (Coord.) **Atlas Escolar, Ceará: espaço geohistórico e cultural.** 2 ed. João Pessoa: Grafset, 2004.

SILVEIRA, Claudinei. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos:** Integração de atributos topográficos em Sistemas de Informações Geográficas e redes neurais artificiais. 153f. Tese (Doutorado em Geografia). Departamento de Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

SIMÕES, S.J.C.; COIADO, E.M. Processos Erosivos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D (Orgs.). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH/UFSM, 2003. cap. 10, pp.283-293.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia agraria,** v.9, n.3, p.317-329, 2008.

SOBRINHO, T. A.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.46-57, jan./fev. 2010.

SOTCHAVA, V. B. **O estudo dos geossistemas.** São Paulo : Instituto de Geografia USP, 1977.

SOTCHAVA, V. B. **Por uma teoria de classificação de geossistemas da vida terrestre.** São Paulo, Instituto de Geografia USP, 1978.

SOUSA, Roneide dos Santos. Análise Integrada da Paisagem e Formas de Uso e Ocupação da Planície Costeira Piauiense. In: ROCHA, G. C.; SANTOS, F. A.; AQUINO, C. M. S. **Piauí**

do litoral ao meio-norte: gestão, uso e conservação, v. 1, Teresina : EDUFPI, 2017, p. 37-56.

SOUSA, Roneide dos Santos. **Planície Costeira do Estado do Piauí:** mapeamento das unidades de paisagem, uso e cobertura da terra e vulnerabilidade ambiental. 138f. Dissertação (Mestrado em Geografia – Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Piauí), Teresina, 2015.

SOUZA, C.R DE G., SOUZA FILHO, P.W.M., ESTEVES, S.L., VITAL, H., DILLENBURG, S.R., PATCHINEELAM, S.M. & ADDAD, J.E. Praias Arenosas e Erosão Costeira. In: C.R. de G. Souza, K. Suguio, A.M. Santos & P.E. Oliveira (eds.). **Revista Quaternário do Brasil**. p.130-152, 2005.

SOUZA, Josuelly Cristainy da; LIMA, Jonathan Tenório de; CAVALCANTI, José Rafael de Albuquerque; COSTA, Karoline Tenório da; COSTA, Maria Elisa Leite, TENÓRIO, Pedro Paulo Cardoso e FREIRE, Cleuda Custodio. Potenciais impactos causados por obras civis em aquíferos costeiros: estudo de caso. In. I Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. **Revista águas subterrâneas**, São Paulo, 2009.

SZCZYGIELSKI, Agata; STATTEGGER, Karl; SCHWARZER, Klaus; SILVA, André G. Aquino da.; VITAL, Helenice; KOENING, Juliane. Evolution of the Parnaíba Delta (NE Brazil) during the late Holocene. **Geo-Mar Lett,** v. 35, n. 2,DOI 10.1007/s00367-014-0395-x, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p.105-117, 2014.

TAGLIANI C.R.A. **Técnica para avaliação da vulnerabilidade de ambientes costeiros utilizando um Sistema Geográfico de Informações**. Porto Alegre, UFRGS, 2002.

TEN CATEN, A. **Aplicação de componentes principais e regressões logísticas múltiplas em sistema de informações geográficas para a predição e o mapeamento digital de solos.** 128f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

TEN CATEN, A. **Mapeamento digital de solos:** metodologias para atender a demanda por informações espacial em solos. 108f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo – Universidade Federal de Santa Maria) Santa Maria, 2011a.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de. L. Regressões logísticas múltiplas: fatores que influenciam sua aplicação na predição de classes de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n.1, p.53-62, 2011b.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de. L. Extrapolação das relações solo-paisagem a partir de uma área de referência. **Ciência Rural**, v.41, n.5, p. 812-816, 2011c.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MENDONÇA-SANTOS, M. de. L. Componentes principais como preditores no mapeamento digital de classes de solos. **Ciência Rural**, v.41, n.7, p. 1170-1176, 2011d.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R. S. D.; MENDONÇA-SANTOS, M. de. L.; GAISSON, E. Mapeamento digital de classes de solos: características da abordagem brasileira. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 11, p.1989-1997, nov., 2012.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. y. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia,** 17, p. 11-23, 2005.

TRICART, Jean. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: FIBGE, 1977.

VALERIANO, M.M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T.G. (Org.). **Geomorfologia, conceitos e tecnologias atuais.** São Paulo: Oficina de Textos, 2008. p.72-104.

VALLADARES, G. S.; HOTT, M.C. The Use of GIS and Digital Elevation Model in Digital Soil Mapping – A Case Study from São Paulo, Brazil. In: **Digital Soil Mapping with Limited Data**, A.E. Hartemink et al. (eds.). Springer Science+Business Media B.V. 2008.

VALLADARES, Gustavo Souza. Geoestatística no Mapeamento Digital de Solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado do Ceará. **Revista Equador (UFPI)**, v.1, n.1, p. 26-43, jun/dez, 2012.

VALLADARES, Gustavo Souza; CABRAL, L. J. R. S. Mapeamento geológico da Planície do Delta do Parnaíba-PI. SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 27. In: **Anais...** João Pessoa, PB, 2017.

VENTURIERI, A.; SANTOS, J.R. Técnicas de classificação de imagens para análise de cobertura vegetal. In: ASSAD, E. D; SANO, E.E. **Sistema de informações geográficas.** Aplicações na agricultura. 2 ed., Brasília: Embrapa - SPI/ Embrapa - CPAC, 1998

VISCARRA ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J.; McBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTA, J. O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties.**Geoderma,** v. 131, n. 1-2, p. 59-75, 2006.

WITTEN, I.H., FRANK, E. **Data mining: practical machine learning tools and techniques**. 2nd edition. San Francisco: Morgan Kaufmann; 2005.

WITTEN, I.H., FRANK E., HALL, M.A. **Data mining: Practical machine learning tools and techniques.** San Francisco: Morgan Kaufmann, 3 ed., 2011.

ZHOU, B.; ZHANG, X.; WANG, R. Automated soil resources mapping based on decision tree and Bayesian predictive modeling. **Journal of Zhejiang University Science**, v.5, n. 7, p. 782 – 795 , 2004.

ZHU, A. X. et al. Soil mapping using GIS, expert knowledge, and fuzzy logic. **Soil Science Society of American Journal**, Madison,v.65, p. 1463-1472, 2001.