



## RISCO DE SALINIZAÇÃO DAS TERRAS DO DELTA DO PARNAÍBA (PI)

Gustavo Souza Valladares<sup>1</sup>, Léya Jéssica Rodrigues Silva Cabral<sup>2</sup>, João Victor Alves Amorim<sup>3</sup>, Jéssica Cristina Oliveira Frota<sup>4</sup> & Mirya Grazielle Torres Portela<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Piauí, Coordenação de Geografia, Campus Ministro Petrônio Portella - Ininga - Teresina - PI, Brasil, CEP: 64049-550, [valladares@ufpi.edu.br](mailto:valladares@ufpi.edu.br).

<sup>2</sup> Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Campus Ministro Petrônio Portella - Ininga - Teresina - PI, Brasil, CEP: 64049-550, [leyarodrigues@hotmail.com](mailto:leyarodrigues@hotmail.com).

<sup>3</sup> Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Campus Ministro Petrônio Portella - Ininga - Teresina - PI, Brasil, CEP: 64049-550, [amorim1994@hotmail.com](mailto:amorim1994@hotmail.com).

<sup>4</sup> Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Campus Ministro Petrônio Portella - Ininga - Teresina - PI, Brasil, CEP: 64049-550, [jessykcris@hotmail.com](mailto:jessykcris@hotmail.com).

<sup>5</sup> Universidade Federal do Piauí, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Campus Ministro Petrônio Portella - Ininga - Teresina - PI, Brasil, CEP: 64049-550, [mgagronoma@yahoo.com.br](mailto:mgagronoma@yahoo.com.br).

### RESUMO

O presente trabalho objetivou gerar um mapa de risco de salinização, compatível com a escala 1:100.000, com resolução espacial de 30 metros, para o Delta do Parnaíba, litoral do Piauí. O mapa foi gerado a partir do tratamento de mapas digitais dos temas solos, geomorfologia, geologia e uso e cobertura das terras, em Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foram geradas cinco classes de risco de salinização, onde 10,3 % da área foi classificada como moderado risco de salinização, 30,6 % risco moderado a alto, 24,9 % alto, 21,6 % muito alto e 12,6 % altíssimo ou naturalmente salinizado. A metodologia utilizada foi eficiente na geração do mapa de risco de salinização e diante dos resultados faz um alerta pelo elevado percentual de solos com grande risco de salinização na área de estudo.

**Palavras-chave:** Geoprocessamento; Método Multicritério Aditivo; Litoral piauiense; Pedologia.

### RISK OF SALINIZATION OF PARNAÍBA DELTA LAND (PI)

#### ABSTRACT

This work aimed to generate a salinization risk map for the Parnaíba Delta, Piauí coast, compatible with the 1:100,000 scale, with spatial resolution of 30 meters. Digital maps about soil, relief, geology and land use and coverage were treated in Geographic Information System (GIS) environment, to make the salinization risk map. Five classes of salinity risk were obtained, where 10.3% of the area was classified as moderate risk of salinization, 30.6% moderate to high risk, 24.9% high, 21.6% very high and 12.6% very high or naturally salinized. The methodology used was efficient in the generation of risk of salinization map, providing an alert for the high percentage of soils with elevated risk of salinization in that study area, and for the importance of soil conservation.

**Key-words:** Geosciences; Multicriteria Additive Method; Coast of Piaui; Pedology.



## INTRODUÇÃO

A atual ocupação das zonas costeiras e sua utilização para fins econômicos vêm gerando impactos e provocando alterações na paisagem natural dos ecossistemas litorâneos, podendo chegar à própria inviabilidade das atividades econômicas diante do quadro de expansão desordenada. Esses impactos induzidos pela pressão antrópica podem trazer sérios problemas, sendo muitas vezes superior a capacidade de suporte dos sistemas naturais, exercendo pressões no ambiente ou produzindo impactos negativos, como remoção da vegetação nativa, degradação dos solos, a modificação do escoamento superficial, drenagem subterrânea, desmatamento de áreas naturais, poluição do solo, impermeabilização do solo, alterações da dinâmica praias e de dunas móveis e oxidação de solos hidromórficos (SVYVITSKI *et al.* 2009). De acordo com pesquisadores essas mudanças estão ocorrendo em deltas mundialmente (SVYVITSKI *et al.* 2009, WORLD BANK, 2009).

O estado do Piauí, na Região Nordeste do Brasil, apresenta somente 66 km de linha de costa, portanto deveria ser objeto de muita atenção no planejamento e conservação dessa área. Todavia, diversos atores que têm algum domínio sobre esse território, não o manejam de forma sustentável. Na área em questão ocorre mineração, aquicultura, desmatamento, aterros inapropriados, caça e pesca irregular, uso agrícola acima da capacidade de suporte do solo, entre outras atividades que levam a degradação ambiental, incluindo a do solo.

Como proposta de pesquisa, é considerada como área de estudo terras próximas da costa do estado do Piauí, que estão inseridas na microrregião do litoral piauiense, segundo dados do IBGE e, do território de Desenvolvimento da Planície Litorânea, conforme o Plano de Ação para o desenvolvimento integrado da Bacia do Parnaíba (PLANAP).

O objeto em estudo ainda integra parte da Área de Proteção Ambiental (APA) do Delta do Parnaíba, criada pela União através do Decreto de 28 de agosto de 1996, com grandes extensões de praias arenosas que formam diferentes paisagens de importância socioeconômica e ambiental o que justifica o desenvolvimento de atividades antrópicas em toda a planície costeira, a citar a pesca artesanal, o turismo, a extração mineral e vegetal, pecuária, lavouras, aquicultura e a urbanização.

O objetivo do presente trabalho é mapear o risco de salinização das terras do Delta do Parnaíba, estado do Piauí, com base em método multicritério aditivo, utilizando geoprocessamento e mapas básicos de geologia, geomorfologia, solos e cobertura das terras.

## INVENTÁRIO, PLANEJAMENTO E GESTÃO AMBIENTAL

A geologia tem um papel importante no planejamento e gestão ambiental interferindo em vários aspectos, como drenagem, porosidade, fonte de sais solúveis. Esse fator exerceu ao longo da história forte influência na sociedade, na civilização e na diversidade cultural da humanidade (SCHOBENHAUS & SILVA, 2010).

O conhecimento sobre o uso e cobertura das terras é de fundamental importância para o planejamento e a gestão territorial. Sendo inventário básico para o domínio dos recursos naturais que se têm em determinada área. É ferramenta para a fiscalização e base para a capacidade de suporte ambiental e adequação do uso das terras. Portanto, fundamental na conservação dos recursos naturais e na sustentabilidade ambiental, social e econômica (IBGE, 2013).

A geomorfologia é básica no estudo da paisagem e no suporte das tomadas de decisão sobre o meio ambiente (SUGUIO, 2000). Interfere fortemente no risco de salinização dos solos (MOTA *et al.*, 2012).



A degradação dos solos é definida como sua perda ou a redução da capacidade de exercer suas funções. Cada vez mais é um problema para a humanidade, sendo que mais de dois bilhões de hectares foram degradados ou estão em processo de degradação. A salinização é uma das formas de degradação dos solos, devendo ser avaliada (JIE et al., 2002). Em bacias hidrográficas que desembocam no mar e em deltas de rios a salinização dos solos têm sido objeto de pesquisas (VALLADARES & FARIA, 2004; FAN et al., 2012; MOTA et al., 2012).

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018) caráter sódico é utilizado para distinguir horizontes ou camadas do solo que apresentem saturação por sódio  $> 15\%$  e solódico variando de 6 a  $<15\%$ . Solos com caráter sálico são caracterizados por condutividade elétrica no extrato saturado maior ou igual que  $7\text{dS/m}$  (a  $25^\circ\text{C}$ ) e salino com valores entre 4 e  $7\text{dS/m}$ . Segundo RAMALHO & BEEK (1995) condutividade elétrica do solo entre 4 e 8 e saturação por sódio entre 8 e  $20\%$ , já representam grau de limitação moderado à agricultura por deficiência de fertilidade; a condutividade elétrica entre 8 e 15 e a saturação por sódio superior a  $15\%$  indicam forte limitação ao desenvolvimento vegetal.

## MATERIAIS E MÉTODOS

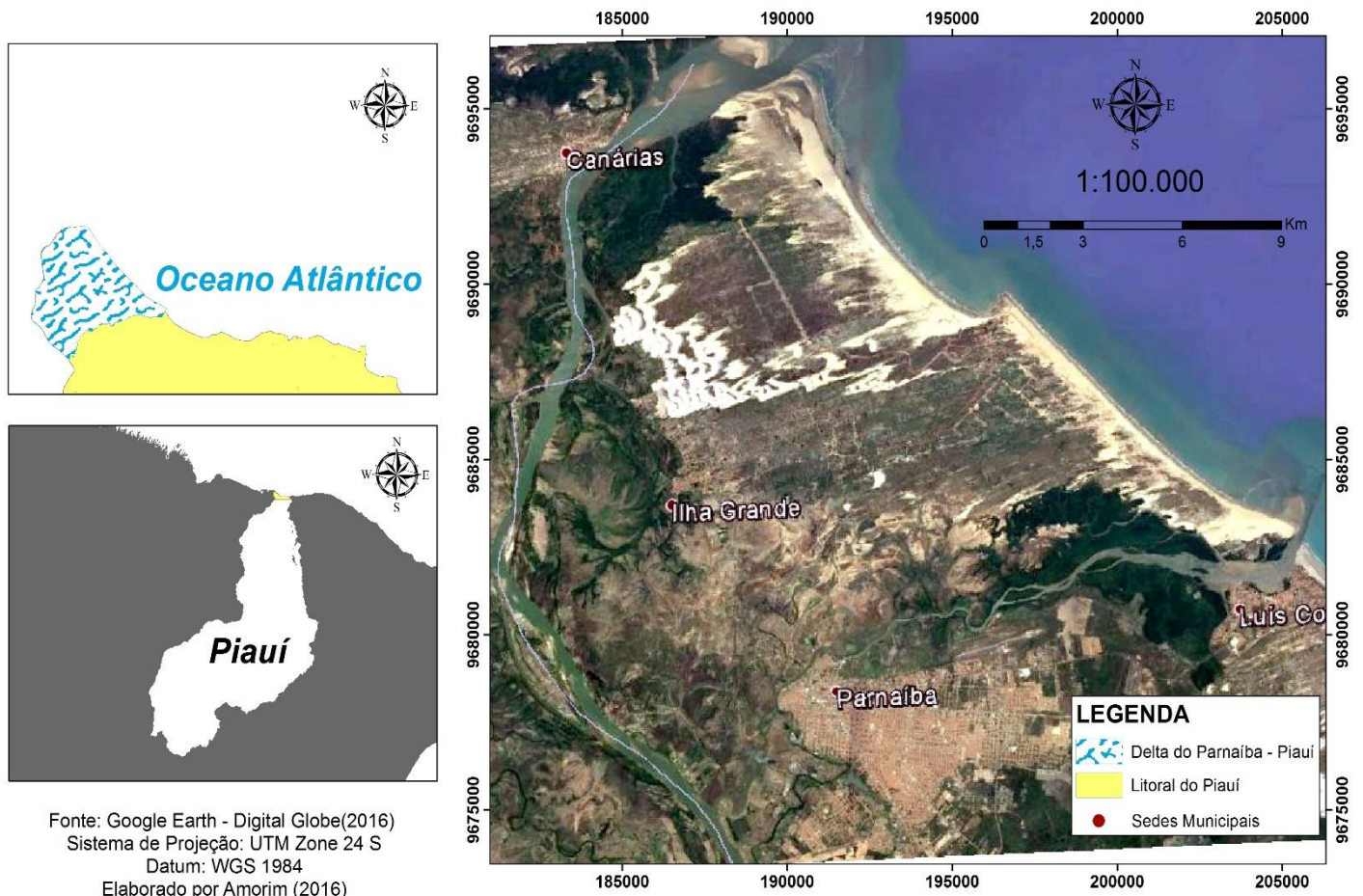
O Delta do Parnaíba está localizado na planície costeira do estado do Piauí, situada na porção norte do litoral piauiense e no nordeste setentrional do Brasil. A zona costeira piauiense apresenta uma linha de costa de  $66\text{km}$  no sentido Leste-Oeste, que vai desde a baía das Canárias (no Delta do Parnaíba, limite com o Maranhão), até o limite com Ceará, na baía formada pela foz dos rios Ubatuba e Timonha. No sentido sul-

norte ela se localiza entre o limite dos depósitos holocênicos com o Grupo Barreiras e o Oceano Atlântico (BAPTISTA, 1975; FUNDAÇÃO CEPRO, 1996).

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  $313809$  hectares e perfazendo um perímetro de  $460812\text{m}$ , 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  $2700\text{km}^2$ , 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 Igaracu. O rio Parnaíba possui uma moderada descarga de sedimentos em suspensão a qual é principalmente atribuída a geologia e condições climáticas da sua bacia de drenagem (SILVA et al., 2015; 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  $290\text{km}^2$ , com praias de até  $200\text{m}$  de largura e ilhas barreiras, que caracterizam a geomorfologia costeira (SZCZYGIELSKI et al., 2015). A figura 1 ilustra a localização da área.

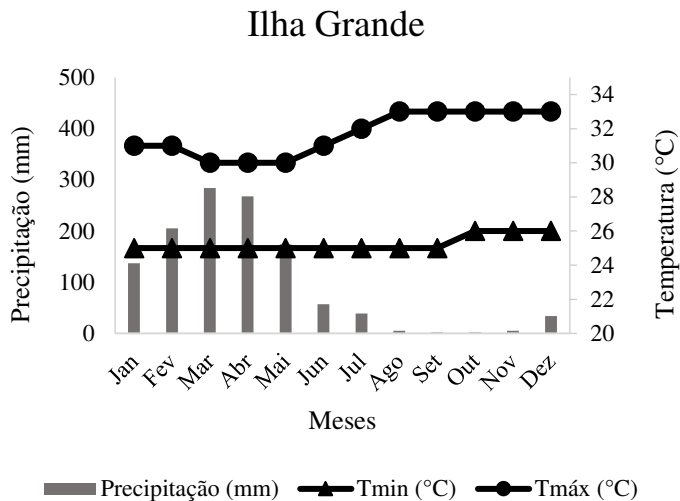


**Figura 1** – Mapa de localização da área de estudo no litoral do Piauí. Fonte: Imagem Digital Globe (2016), adaptado por Amorim (2016).

Para a análise dos dados climáticos da área de estudo foram analisados os dados das Normais Climatológicas do Brasil para o período de 1961 a 1990 (INMET, 1992). Esses dados foram obtidos da estação meteorológicas da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) no Estado do Piauí próximas a área de estudo, como por exemplo Parnaíba, 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 (figura 2).

As condições climáticas do município de Ilha Grande (com altitude da sede a 10m acima do nível do mar) apresentam temperaturas médias mínimas de 25°C e médias máximas de 35°C (INMET, 1992), com clima quente tropical. A precipitação pluviométrica média anual é definida no Regime Equatorial Marítimo, com média anual de 1300mm, 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 (INMET, 1992).





**Figura 2** – Comportamento da Temperatura do Ar Atmosférico (médias das máximas e mínimas) e Precipitação ao longo do ano no município de Ilha Grande – Piauí. Fonte dos dados: INMET/CFS/Interpolação.

A caracterização geológica, do relevo e dos solos foi baseada nos trabalhos de SOUSA & VALLADARES (2016); FROTA (2017); CABRAL (2018) e serão apresentados nos resultados.

No mapeamento do uso e cobertura das terras foram utilizadas imagens RapidEye (CATÁLOGO-MMA, s.d.). Os produtos datam dos dias: 30 de Julho, 23 de Outubro e 02 de Dezembro de 2012, obtido no Geocatálogo do Ministério do Meio ambiente (CATÁLOGO-MMA, s.d.). FLORENZANO (2011) ressalta que o tipo de imagem (resolução, banda, composição colorida, data), deve ser selecionado considerando os objetivos e as características da área de estudo, deve ser observado através do tipo de textura topográfica, o tipo de clima, e o tipo de cobertura e uso da terra presente na área que se pretende estudar. Dessa forma, como os ambientes da superfície terrestre são dinâmicos, a data da imagem é uma informação extremamente importante, pois a imagem é uma representação de uma parte da superfície da Terra no momento da passagem do satélite, e sua escolha dependerá do tipo de aplicação que se fará, bem como

o objetivo, levando-se em consideração a sazonalidade (FLORENZANO, 2011).

Para o mapeamento do uso e cobertura das terras, o método de classificação utilizado para a pesquisa consistiu na classificação automática não-supervisionada, na qual o próprio computador, sem o auxílio usuário e com base em regras estatísticas, decide quais são as classes a serem separadas e quais os “pixels” pertencentes a cada uma (BERNARDI et al., 2007). Na imagem RapidEye foi selecionada a composição de bandas falsa cor RGB 4-5-3 (infravermelho limítrofe, infravermelho próximo e vermelho), utilizando classificação não supervisionada. Após esse procedimento foi manuseada, no ArcGIS 10.2, o conjunto de ferramentas Spatial Analyst Tools presente no ArcToolbox e aplicou-se a função Multivariate → Iso Cluster Unsupervised Classification (BERNARDI et al., 2007), onde selecionou-se 20 classes para a classificação inicial, de modo a diferenciar mais detalhadamente os elementos da imagem.

O mapa de risco de salinização foi gerado com o uso de um método multicritério ordinal aditivo, definido por XAVIER-DA-SILVA (2001) como média ponderada. A integração entre Sistema de Informação Geográfica (SIG) e Apoio Multicritério à Decisão é abordada na literatura (GOMES & ESTELLITA LINS, 2002). Na metodologia os mapas temáticos recebem pesos e as unidades de mapeamento dos mapas notas. Quanto maior forem as notas maior o risco daquela unidade de mapeamento. Na sequência os mapas são sobrepostos.

Um algoritmo sugerido para a sobreposição dos mapas e a geração do mapa de risco, utilizado em vários trabalhos sobre inferência espacial de riscos ambientais (VALLADARES & FARIA, 2004; GARCIA et al., 2006; MEIRELLES et al., 2007;



MOTA et al., 2012), e que é adequado aos mapas raster utilizados, é apresentado a seguir (Eq. 1):

$$A_{ij} = \sum n (P_k \cdot N_k) \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:  $k = 1$ ;  $A_{ij}$  = qualquer célula da matriz (alternativa);  $n$  = número de parâmetros envolvidos;  $P$  = peso atribuído ao parâmetro, transposto o percentual para a escala de 0 a 1;  $N$  = nota na escala de 0 a 10, atribuída à categoria encontrada na célula.

O modelo foi aplicado individualmente aos temas, de forma a atribuir valores de risco para que fossem analisados em conjunto com os mapas temáticos da área de estudo, gerados por meio do software ArcGIS com a função RASTER CALCULATOR, permitindo o tratamento dos dados e as análises do risco de salinização dos solos.

Para a realização das avaliações foram utilizadas informações de pedologia, geologia, geomorfologia e uso e cobertura das terras. Para esses temas é que foram atribuídos os pesos e as notas do risco de salinização.

Os pesos e notas foram atribuídos com base na experiência e por consenso de equipe multidisciplinar

## RESULTADOS

A geologia da área de estudo foi totalmente mapeada como sedimentar, devido a escala do trabalho. Somente em uma pequena extensão na praia Pedra do Sal afloram rochas cristalinas do Pré-Cambriano, conhecidas como Granito Chaval ou Granito Pedra do Sal (GORAYEB & MEIGUINS, 2018). PFALTZGRAFF et al. (2010) destacam que os terrenos cenozoicos da planície do Delta do Parnaíba estão contidos nos domínios da Província Costeira, correspondendo basicamente a sedimentos Quaternários (depósitos de origens flúvio aluvionar, fluvio-marinha, marinha e eólica), constituindo as feições geológico-geomorfológicas que compõem o Delta do Parnaíba.

especializada em meio físico e na interpretação de mapas de riscos ambientais. Os resultados quantitativos foram transformados em classes qualitativas como, por exemplo, baixo, moderado, alto, muito alto, etc. Metodologia semelhante foi empregada nos trabalhos de CREPANI et al. (1996), VALLADARES & FARIA (2004) e MOTA et al. (2012).

O mapa de risco de salinização foi gerado utilizando o método multicritério citado acima, os pesos para cada um dos temas considerados foram 40% para pedologia e 20% para os demais temas. As notas do risco salinização foram atribuídas às unidades de mapeamentos dos mapas de cada tema, numa escala de 0 a 10, indicando que quanto maior a nota, maior o risco de salinização da unidade de mapeamento. Para as áreas fora de análise como, por exemplo, corpos d'água e zona urbana, foram atribuídas notas altíssimas (1000), como um artifício matemático para fácil identificação.

Com base nos trabalhos de CPRM (2006) e PFALTZGRAFF et al. (2010) a geologia da área de estudo foi mais detalhada (CABRAL, 2018) com intensos trabalhos de campo e interpretação de imagens de 5 metros de resolução espacial, conforme segue:

- Depósitos litorâneos de praias recentes (Q21p)- Formações geológicas do Quaternário com acumulações de areias de granulação fina a grossa, ocasionalmente cascalhos, moderadamente selecionadas, contendo restos de conchas, matéria orgânica e minerais pesados. Forma um alongado depósito contínuo, por toda a extensão da costa, desde a linha de maré baixa até a base das dunas móveis. Nesta formação incluem-se os Granitos na praia da Pedra do Sal. Recebeu nota 10 para risco de salinização



devido a proximidade com o mar e a adição diária de sais.

•Depósitos eólicos litorâneos móveis (Q2e)- originados por processos eólicos de tração, saltação e suspensão subaérea, formados por areias esbranquiçadas, de granulação fina a média, quartzosas, com grãos de quartzo foscos e arredondados. Muitas vezes encerram níveis de minerais pesados, principalmente ilmenita além de estratificações cruzadas de médio a grande porte e marcas ondulares eólicas. São caracterizadas pela ausência de vegetação e ocorrem mais próximas à linha de praia, onde a ação dos ventos é mais intensa. Recebeu nota 7 para risco de salinização pela maior distância da fonte de sal, no caso o mar.

•Depósitos eólicos litorâneos fixos (Qe)- originados por processos eólicos de tração, saltação e suspensão subaérea, formados por areias de granulação fina a média, raramente siltosas, quartzosas ou quartzo feldspáticas, ocorrem à retaguarda ou entremeadas com as dunas móveis e apresentam incipiente desenvolvimento de processos pedogenéticos, resultando na fixação de um revestimento vegetal pioneiro ou de pequeno porte que impede ou atenua a mobilização eólica. Esses depósitos provavelmente representam uma geração de idade intermediária entre as paleodunas e as dunas móveis ou atuais. Recebeu nota 8 por estar mais próximo ao mar e receber por via aérea sais.

•Depósito fluvioaluvionares (Qfa)- Os maiores depósitos aluvionares ocorrem ao longo das planícies fluviais dos rios Parnaíba e Igarçu, e em menores proporções, nos outros rios da região, são resultante da acumulação fluvial, sujeito a inundações periódicas. Formados, essencialmente, por areias, cascalhos, siltes e argilas, com ou sem matéria orgânica. Recebeu a nota 5, intermediária, pois apesar desses sedimentos terem baixos teores de sais na sua origem, os mesmos são

finos, de baixa permeabilidade e pela cota baixa já sofreram adições de sais de origem marinha. A elevada evapotranspiração também favorece a concentração de sais.

•Depósito de Pântanos e Mangues (Qpm)- são ambientes transicionais ou mistos, formados pela sedimentação de origem continental e marinha. O contato de água doce com água salgada proporciona, pelas diferenças de pH entre os dois meios, a floculação ou precipitação de argilas em suspensão, resultando na deposição de material escuro e lamacento, rico em matéria orgânica, que aumenta a cada período de maré cheia, até formar o ambiente propício à instalação dos manguezais, com o desenvolvimento de vegetação típica de tais ambientes. Esses depósitos estuarinos são acumulados nas desembocaduras fluviais, penetrando no continente até onde se faz sentir a influência das marés. Na área do Delta, as principais planícies fluvio marinhas são aquelas associadas aos rios Parnaíba e Igarçu. O entrelaçado labiríntico dos canais distributários que formam o Delta isola um grande número de ilhas (mais de 70), muitas delas contendo importantes formações de manguezais. Naturalmente salinos recebeu nota 10.

•Depósitos arenosos (Qd)- As acumulações são constituídas por areias inconsolidadas, de coloração acastanhada, acinzentada e/ou esbranquiçada, de granulação média a fina, bem selecionadas, de composição quartzosa/quartzofeldspática, com grãos de quartzo foscos e arredondados e granulação fina em nível de silte. A estabilização é mantida pela cobertura vegetal. Corresponde à primeira geração de dunas da área, formadas provavelmente em um episódio de nível relativo do mar mais elevado que o atual ocorrido durante o Pleistoceno, este movimento regressivo propiciou a geração de um terraço marinho, que foi, em parte, retrabalhado eolicamente, fornecendo material



para a construção das paleodunas. Pela distância da linha da costa recebeu nota 7.

A feições geomorfológicas da área de estudo foram caracterizadas por SOUSA et al. (2014) e revisadas e melhor detalhadas por FROTA (2017):

- Cordão arenoso- correspondendo a uma área plana resultante de acumulação marinha, dentre eles, praias, canais de maré, cristas de praia, restingas, ilhas barreira. Ocorre nas baixadas litorâneas sob a influência dos processos de agradação marinhos. Recebeu nota 8 para o risco de salinização.

- Planície eólica- área aplainada entre as dunas constituídas de sedimentos eólicos em laminações lisas, bem como estratificações cruzadas truncadas entre as dunas ativas. A extensão das interdunas varia em função do suprimento sedimentar e da presença de água no sistema (lençol freático). Recebeu nota 6.

- Dunas móveis- esta unidade de paisagem corresponde a depósitos arenosos paralelos à linha de costa, produzida pelo transporte e deposição de partículas pelo vento, sua assimetria é justificada pela inclinação maior no lado sotavento que no lado barlavento. Tal feição geomorfológica não apresenta cobertura vegetal ou ocorrem em sua superfície somente espécies pioneiras e de pequeno porte, sendo instáveis e migratórias. Recebeu nota 3.

- Dunas fixas- são dunas em processo de estabilização, sendo estas, parcialmente recobertas por vegetação pioneira devido o maior teor de matéria orgânica e a ocorrência de um estrato superficial em processo de edafização, propiciando a presença do caráter eutrófico que favorece o desenvolvimento de espécies vegetais. Recebeu nota 6, por localizarem-se mais próximas ao mar e conterem formas com acumulação sazonal de água e início de processo de paludização.

- Paleodunas- corresponde às dunas antigas que estão recobertas por uma vegetação herbácea ou

arbustiva, estando, portanto, imobilizado e bioestabilizadas. Por serem mais antigas, favorecem a estabilização do relevo, que ocasionam melhoria das condições edáficas, contribuindo para uma maior estruturação das camadas superficiais, através de suportes de matéria orgânica. Recebeu nota 3.

- Planície flúvio-marinha- representa a área plana resultante da combinação de processos de acumulação fluvial e marinha sujeita a inundações periódicas, podendo comportar canais fluviais, manguezais, cordões arenosos e deltas, ocorrendo nas baixadas litorâneas, próximo às embocaduras fluviais, e está localizada em áreas onde há influência das oscilações da maré. Recebeu nota 10, pela adição diária de sais durante as marés.

- Planície e terraço-fluvial- corresponde a áreas planas resultantes de acumulação fluvial, periodicamente alagada, com meandros abandonados. Ocorrem nos vales com preenchimento aluvial, contendo material fino a grosseiro, pleistocênico e holocênico. Recebeu nota 3.

- Praia- são depósitos de areias acumuladas pelos agentes de transportes fluviais ou marinhos. As praias representam cintas anfíbias de grãos de quartzo, apresentando uma largura maior ou menor, em função da maré. Algumas vezes podem ser totalmente encobertas por ocasião das marés de sizígia. Quanto ao material que compõe as praias, há um domínio quase absoluto dos grãos de areia de quartzo. Recebeu nota 10 por conta da presença de sais misturados ao quartzo e outros minerais primários.

O mapa de solos é de nível de reconhecimento de alta intensidade, adotou a metodologia proposta por EMBRAPA (1995), SANTOS et al. (2005) e SANTOS et al. (2018). As unidades de mapeamento de solos foram definidas conforme o quadro 1.





SIMBOLOGIA	UNIDADES DE MAPEAMENTO	NOTA
SNo	Associação complexa de: PLANOSSOLO NÁTRICO Sílico neofluvisólico, textura média e média/argilosa + NEOSSOLO FLÚVICO Ta Eutrófico típico, textura indiscriminada + NEOSSOLO FLÚVICO Sódico 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.	7
GXve	Complexo de: GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico – GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico neofluvisólico, 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.	8
GJ1	Associação de: GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico, textura média e argilosa + GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico neofluvisólico, textura média, ambos A moderado, fase relevo plano, fase de vegetação de mangue.	10
GJ2	Associação de: GLEISSOLO TIOMÓRFICO Órtico sódico, A moderado + GLEISSOLO HÁPLICO Sódico neofluvisólico, A fraco e A moderado, textura indiscriminada, fase relevo plano, vegetação de mangue.	10
RQo1	Associação de: NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico, fase relevo suave ondulado e plano, restinga arbustiva e arbórea + NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Hidromórfico sílico sódico + ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico ârenico sódico + ESPODOSSOLO HUMILÚVICO Hidromórfico arênico neofluvisólico sódico, todos A fraco, fase relevo plano, campo hidrófilo de várzea e restinga arbustiva.	10
RQo2	Associação de: NEOSSOLO QUARTZARÊNICO Órtico sódico A fraco, fase vegetação de restinga + Dunas, ambos fase relevo plano e suave ondulado.	10

**Quadro 1:** Simbologia, unidades de mapeamento de solos e notas do risco de salinização.



A partir da classificação da imagem digital de uso e cobertura das terras. Para a área, as classes RapidEye do ano de 2012, foram mapeadas 12 classes observadas são apresentadas no quadro 2.

CLASSES DE USO E COBERTURA DAS TERRAS	DESCRIÇÃO	NOTA
Água – Corpos Lênticos	Ambientes aquáticos de água parada.	FA
Água – Rios e Oceano	Compreende os principais cursos d’água da região, tais como o rio Parnaíba e rio Igarapu, além do Oceano Atlântico.	FA
Área Urbana	São áreas em que a vegetação natural foi modificada pelo homem, para diversos usos, principalmente construção e edificação.	FA
Campos	Campos naturais abertos com predominância de vegetação herbácea e/ou arbustiva, associada a terrenos alagadiços ou não.	6
Dunas e Cordões Arenosos	Compreende a 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.	4
Praia	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	10
Solo Exposto	Corresponde às áreas em que toda ou quase toda a cobertura vegetal do solo foi removida, principalmente pelo uso antrópico. No período de estiagem podem ocorrer áreas com vegetação rasteira.	8
Vegetação arbórea arbustiva	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.	3
Vegetação arbustiva densa	Representam as áreas em que predominam vegetação de porte arbustivo e fechado/denso.	3
Vegetação de Mangue	Compreende a área próxima ao litoral com o predomínio de manguezais. Essas áreas possuem vegetação arbórea composta por espécies que são típicas para estes locais.	10
Vegetação Paludosa	Compreende aos tipos de Vegetação próximos as margens dos rios, associadas a planícies de inundação.	8
Vegetação rasteira	Compreende áreas de campos naturais abertos, com vegetação rasteira, utilizado principalmente pela pecuária extensiva.	3

**Quadro 2.** Descrição das classes de cobertura das terras definidas para a área de estudo.

FA- fora de análise. Fonte: Adaptado de Sousa (2015).



O mapa de risco de salinização é apresentado na figura 3 e as classes de risco de salinização (Quadro 3).

A legenda do mapa foi a seguinte: moderado, moderado a alto, alto, muito alto e altíssimo ou naturalmente salino/sódico.

Classes de risco de salinização	Área	
	km <sup>2</sup>	%
Moderado	23,07	10,3
Moderado a Alto	68,91	30,6
Alto	56,03	24,9
Muito Alto	48,60	21,6
Altíssimo ou solos naturalmente salinos/sódicos	28,34	12,6
<b>TOTAL</b>	<b>224,95</b>	<b>100</b>

**Quadro 3.** Áreas das classes de risco de salinização das terras do Delta do Parnaíba (PI).

O equivalente a 10,3 % da área foi classificado como moderado risco de salinização, 30,6 % risco moderado a alto, 24,9 % alto, 21,6 % muito alto e 12,6 % altíssimo ou naturalmente salino/sódico.

## DISCUSSÃO

As terras que apresentaram moderado risco de salinização são formadas por sedimentos de origem aluvial, formando terraços aluviais geralmente bem drenados e solos classificados como Neossolos Flúvicos Ta Eutróficos da unidade SNo, de textura variando de média a argilosa, com vegetação arbórea ou arbustiva. Parte desses solos são utilizados com pastagem ou lavouras de sequeiro. Esses são os solos com melhor aptidão para agricultura de sequeiro ou até mesmo para irrigação por aspersão ou gotejamento da área de estudo. O manejo adequado dessas terras pode conduzir a elevadas produtividades, mas deve-se levar em consideração a qualidade da água para a irrigação, assunto não abordado no presente trabalho.

As terras classificadas como risco moderado a alto de salinização apresentam grandes diferenças nos aspectos geoambientais e de potencialidades de uso. Uma parte tem a mesma geologia e geomorfologia das terras da classe moderada, isto é, sedimentos de origem aluvial em terraços aluviais, porém os solos nessas terras apresentam maior impedimento a drenagem, condutividade elétrica e sodicidade mais elevadas, ocorrendo na associação de solos, até mesmo solos com maior risco de salinização, mas devido a escala do trabalho, não foi possível individualizar. O uso com agricultura irrigada desses solos pode conduzir a salinização. Outra unidade de paisagem que possui solos com a classe moderada a alta corresponde a geologia de sedimentos aluviais, formando terraços ou planícies. Nessa situação, os solos têm impedimento a drenagem, sendo na sua maioria mal drenados. São principalmente Gleissolos Háplicos Ta Eutróficos com boa aptidão para culturas adaptadas a essa condição, como arroz irrigado e açaí, usos já observados de forma esparsa nessas terras, que também possuem pastagem de boa qualidade. E a terceira unidade de paisagem que se enquadrou na classe moderada a alta correspondem a sedimentos arenosos, muito permeáveis, de dunas e Neossolos Quartzarênicos com saturação relativamente elevada de sódio, mas baixa condutividade elétrica. Esses solos têm como vocação a extração de frutos como o caju (*Anacardium occidentale*), mas também são utilizados com pastagem, que não apresentam boa aptidão, levando a degradação dos solos e baixa capacidade de suporte.

A classe alta corresponde a duas unidades de paisagem distintas, uma parte corresponde a planícies muito mal drenadas, com sedimentos de origem aluvial argilosos ou de textura média, sendo solos com grande risco de acúmulo de sais pela forte restrição a drenagem, possuem pastagem, tanques de aquicultura e extração vegetal como o de açaí (*Euterpe oleracea*



Mart.). A outra correspondem a solos arenosos originários de sedimentos eólicos em cordões arenosos próximos ao litoral que recebem grande quantidade de sais, principalmente sódio. O uso mais comum dessas

terras é com pastagem, não obtendo bom retorno econômico, devido a baixa qualidade da forragem e baixa biomassa, sendo o pastoreio um agente que conduz a degradação desses solos.

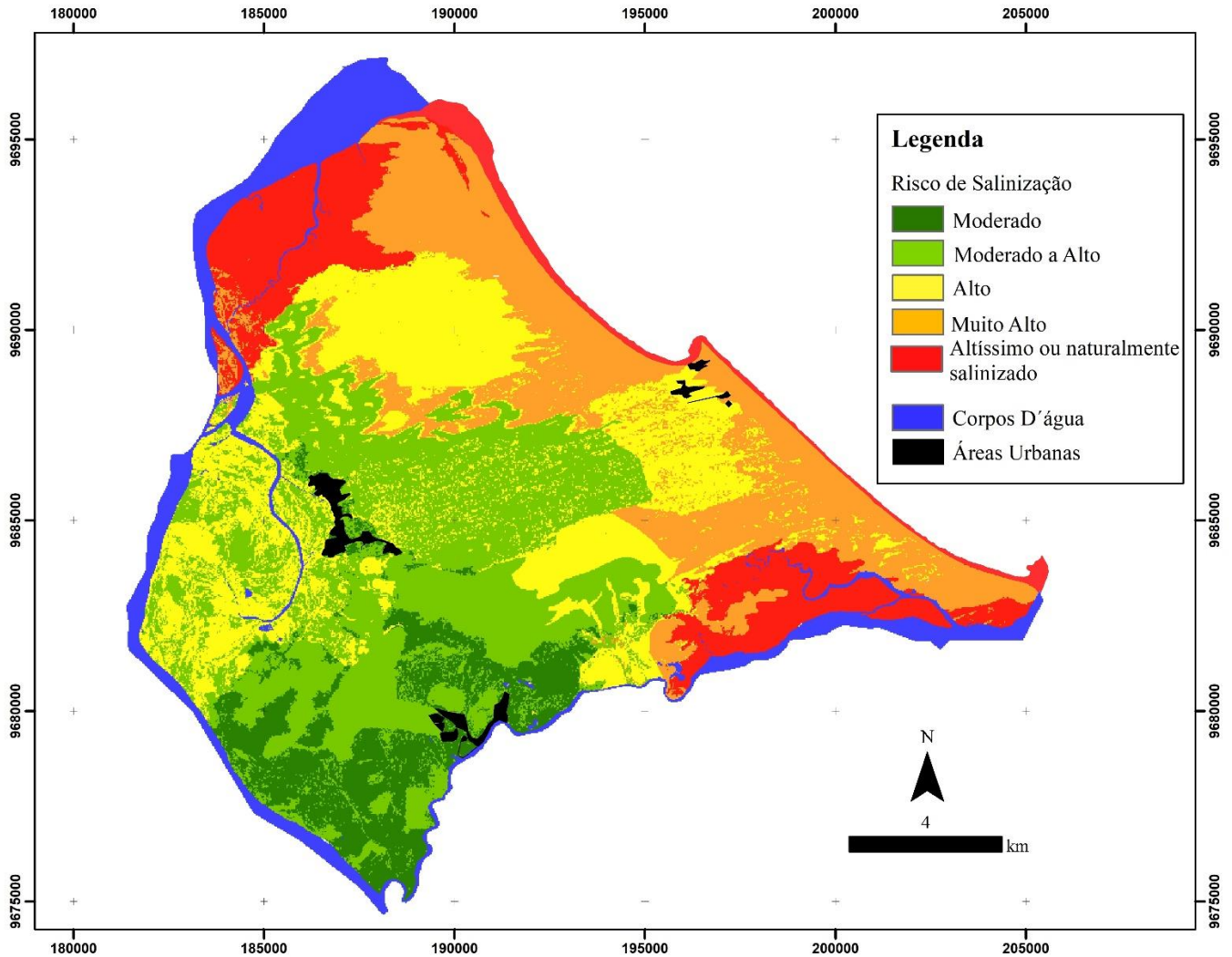


Figura 3 – Risco de salinização das terras do Delta do Parnaíba – Piauí.

A classe muito alta são terras semelhantes a essas, ainda mais próximas do litoral e com cobertura vegetal herbácea ou sem cobertura vegetal. Paisagem com beleza cênica e que podem ser utilizadas para o turismo.

A classe altíssimo risco ou naturalmente salinizado correspondem a planícies flúvio-marinhas,

com Gleissolos Tiomórficos, ácidos, com elevada condutividade elétrica, muito mal drenados, formados por sedimentos finos e vegetação de mangue. Essas terras carecem de políticas públicas efetivas para a sua preservação, pois além de serem berçários naturais para várias espécies, são importantes para a extração do caranguejo-açu, a pesca, e com grande potencial de





estocagem de carbono, tanto nos solos como na vegetação, carbono conhecido como “blue carbon”. São áreas próximas ao mar e aos canais por onde entram as águas com maiores concentrações de sais das marés cheias. Além de praias e de bermas com alta saturação por sódio e formada por sedimentos arenosos.

## CONCLUSÃO

A utilização do método multicritério aditivo foi adequada na modelagem do risco de salinização. E em aplicação com SIG foi possível ter a dimensão espacial dos solos salinizados ou com maior risco de salinização, que ocupam uma área superior a metade de todo o território estudado. Foi possível fazer relação do processo de salinização dos solos com as características geoambientais, e ainda fazer inferência ao uso do solo, seja para agricultura ou extrativismo. O mapa gerado pode auxiliar na gestão agroambiental da área estudada, pois áreas salinizadas e com maior risco podem ser direcionadas a preservação ambiental e produzir serviços ambientais, ao contrário de se tornarem áreas degradadas. As áreas com maiores riscos são próximas ao mar e aos canais fluviais, as terras mais distantes apresentam menor risco de salinização, o que se deve pela fonte marinha rica em sais.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo financiamento da pesquisa, processo 443176/2014-0 e pela bolsa de produtividade e pesquisa nível 2 do primeiro autor. A CAPES e FAPEPI pela bolsa de estudos dos demais autores.

## REFERÊNCIAS

BAPTISTA, J.G. 1975. Geografia Física do Piauí. Teresina: 2. ed. COMDEPI.

BERNARDI, H.V.F; DZEDZEJ, M. & CARVALHO, L.M.T. 2007. Classificação digital do uso do solo comparando os métodos “pixel a pixel” e orientada ao objeto em imagem QuickBird. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, SC. In: Anais... Florianópolis, SC, p. 5595-5602.

CABRAL, L.J.R.S. 2018. Levantamento Pedológico Da Planície Do Delta Do Parnaíba, PI. (Dissertação de mestrado). Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Piauí. Teresina.

CATÁLOGO-MMA. Disponível em: <<http://geocatalogo.ibama.gov.br/>> (acesso: 10-06-2016).

CLIMATEMPO. Disponível em: <<http://www.climatempo.com.br/climatologia/>>. (acesso: 20-12-2018).

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 2006. Mapa Geológico do Estado do Piauí: 2ª versão. Piauí. Teresina: CPRM. 1CD Rom. Escala 1:1.000.000

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, P. & FLORENZANO, T. 1996. Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico. São José dos Campos: INPE. 25 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de solo. 1995. Procedimentos Normativos de Levantamentos Pedológicos – Humberto Gonçalves dos Santos – Brasília: EMBRAPA –SPI.

FAN, X.M.; LIU, G.H.; TANG, Z.P. & SHU, L.C. 2010. Analysis on main contributors influencing soil salinization of Yellow River Delta. Journal of Soil and Water Conservation, 24: 139-144.

FLORENZANO, T.G. 2011. Iniciação em sensoriamento remoto. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos.

FROTA, J.C.O. 2017. Potencial de Expansão Urbana na Planície Costeira do Estado do Piauí. (Dissertação de mestrado). Programa de Pós Graduação em Geografia, Universidade Federal do Piauí. Teresina.



- FUNDAÇÃO CEPRO. 1996. Macrozoneamento Costeiro do Estado do Piauí: Relatório Geoambiental e Socioeconômico. Teresina: [S.e].
- GARCIA, J.M.P.; XAVIER-DA-SILVA, J.; GOES, M.H.B. & DIAS, J.E. 2006. Avaliação ambiental por geoprocessamento para delimitação e classificação de áreas de susceptibilidade a movimentos de massa na região de Itatiaia no Estado do Rio de Janeiro. *Caminhos da Geografia (UFU. Online)*, 17: 199-209.
- GOMES, E.G. & ESTELLITA LINS, M.P. 2002. Integrating Geographical Information Systems and Multi-criteria Methods: a case study. *Annals of Operations Research*, 116: 243-269.
- GORAYEB, P.S. & LIMA, A.M.M. 2018. Aspectos texturais do magmatismo e tramas da tectônica impostas ao Granito Chaval na Zona de Cisalhamento Santa Rosa, extremo Noroeste da Província Borborema. *Brazilian Journal of Geology*, 44: 653-668.
- IBGE. 2013. Instituto de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Uso da Terra, 3ª ed., 171 p.
- INMET. BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento de Meteorologia. 1992. Normais Climatológicas (1961– 1990). Brasília, DF.
- JIE, C.; JING-ZHANG, C.; MAN-ZHI, T. & ZI-TONG, G. 2002. Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences*, 12: 243-252.
- MEIRELLES, M.S.P.; MOREIRA, F.R. & CAMARA, G. 2007. Técnicas de inferência espacial. In: MEIRELLES, M.S.P.; CAMARA, G.; ALMEIDA, C.M. (ed.). *Geomática. Modelos e aplicações ambientais*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. p. 105-190.
- MOTA, L.H.O.; GOMES, A.S.; VALLADARES, G.S.; MAGALHÃES, R.M.F.; LEITE, H.M.F. & SILVA, T.A. 2010. Risco de salinização das terras do baixo Acaraú (CE). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36: 1203-1209.
- PFALTZGRAFF, P.A. dos S. Geodiversidade do Piauí: programa geologia do Brasil. Levantamento da geodiversidade. Recife: CPRM, 2010.
- RAMALHO FILHO, A.; BEEK, K.J. Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras. 1995.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; & CUNHA, T. 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, DF: Embrapa.
- SANTOS, R. D.; et al. 2005. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5. Ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 100 p.
- SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C.R. 2010. O papel indutor do Serviço Geológico do Brasil na criação de geoparques. Brasília: CPRM–Serviço Geológico do Brasil.
- SILVA, A.G.A. 2015. The parnaíba river delta - from modern hydro and morphodynamics to sea level change. Dissertation : Zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität, Kiel.
- SILVA, A.G.A.; STATTEGGER, K.; SCHWARZER, K.; VITAL, H. & HEISE, B. 2015. The Influence of Climatic Variations on River Delta Hydrodynamics and Morphodynamics in the Parnaíba Delta, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 31: 930-940.
- SUGUIO, K. 2000. A importância da geomorfologia em geociências e áreas afins. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 1: 80-87.
- SOUSA, R.S. & VALLADARES, G.S. 2016. Mapeamento das unidades de paisagem da Planície Costeira do estado do Piauí. In: SCABELLO, Andrea Lourdes Monteiro; SILVA, Cleonice Carvalho; ANDRADE, Maria do Socorro P. Sousa; ARAÚJO, Raimundo Lenilde de. *Geografia em debate*. Teresina : EDUFPI, 2016.
- SOUSA,, R.S.; VALLADARES,, G.S. & AQUINO,, R.P. 2014. Mapeamento das Unidades



Geomorfológicas Da Planície Costeira Do Estado Do Piauí. Revista Geonorte, 5: 110 - 114.

SZCZYGIELSKI, A.; STATTEGGER, K.; SCHWARZER, K.; DA SILVA, A. G. A.; VITAL, H. & KOENIG, J. 2015. Evolution of the Parnaíba Delta (NE Brazil) during the late Holocene. Geo-Marine Letters, 35:105-117.

SVYVITSKI, J.P.M.; KETTNER, A.J.; OVEREEM, I.; HUTTON, E.W.H.; HANNON, M.T.; BRAKENRIDGE, G.R.; DAY, J.; VOROSMARTY, C.; SAITO, Y.; GIOSAN, L. & NICHOLLS, R.J. 2009.

Sinking deltas due to human activities. Nature Geoscience. 2, 681–686.

VALLADARES, G.S. & FARIA, A.L.L. 2004. SIG na análise do risco de salinização na Bacia do Rio Coruripe, AL. Engevista, 6: 86-98.

WORLD BANK. 2009. World Development Report 2009: Reshaping Economic Geography. Washington.

XAVIER DA SILVA, J. 2001. Geoprocessamento para Análise Ambiental. Rio de Janeiro: [S.e.].