

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

RAFAELA FERREIRA CAITANO

**GEOPROCESSAMENTO NA ANÁLISE DE RISCO DE SALINIZAÇÃO DOS
SOLOS DO ESTADO DO CEARÁ**

FORTALEZA

2012

RAFAELA FERREIRA CAITANO

GEOPROCESSAMENTO NA ANÁLISE DE RISCO DE SALINIZAÇÃO DOS
SOLOS DO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D.

FORTALEZA - CE
2012

RAFAELA FERREIRA CAITANO

GEOPROCESSAMENTO NA ANÁLISE DE RISCO DE SALINIZAÇÃO DOS
SOLOS DO ESTADO DO CEARÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola.

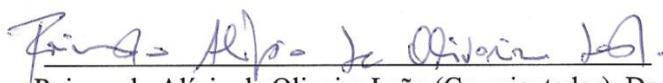
Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em 29 de fevereiro de 2012

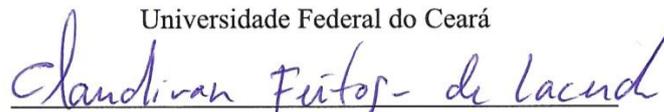
BANCA EXAMINADORA



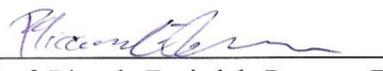
Prof. Adunias dos Santos Teixeira (Orientador), Ph.D.
Universidade Federal do Ceará



Raimundo Alípio de Oliveira Leão (Co-orientador), Dr.
Universidade Federal do Ceará



Prof. Claudivan Feitosa de Lacerda, Dr.
Universidade Federal do Ceará



Prof. Ricardo Espíndola Romero, Dr.
Universidade Federal do Ceará

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

C136g Caitano, Rafaela Ferreira.
 Geoprocessamento na análise de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará /
Rafaela Ferreira Caitano. – 2012.
 149 f. : il. color., enc. ; 30 cm.

Agrárias,
Engenharia Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências
 Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em
 Agrícola, Fortaleza, 2012.
 Área de Concentração: Manejo de Bacias Hidrográficas do Semiárido.
 Orientação: Prof. PhD. Adunias dos Santos Teixeira.

Mapeamento 1. Solos – salinidade - Ceará. 2. Sistemas de informação geográfica. 3.
 de solos – Ceará. I. Título.

*A minha família:
aos meus pais Fernando e Sirley,
às minhas irmãs Fernanda e Karla,
e aos melhores amigos, Bento e Joaquim.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus por todo amor, generosidade e concessão da bênção de mais uma conquista.

Aos meus pais Fernando e Sirley, às minhas irmãs Fernanda e Karla, e meus queridos Bento e Joaquim, pelo amor, confiança e suporte incondicionais além da compreensão das minhas ausências. As minhas tias, tios, avós e meus queridos primos por encherem minha casa de vida e riso.

Ao Fernando Bezerra Lopes, pelo companheirismo, paciência, incentivo, por todos os trabalhos e responsabilidades compartilhados, pelas muitas horas dedicadas à discussão e contribuição direta com minha dissertação, além das inúmeras memórias que construímos juntos.

A Universidade Federal do Ceará, através do Departamento de Engenharia Agrícola, pela ocasião de realização do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão do recurso financeiro indispensável à realização do curso.

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade - INCTSal, pelo apoio financeiro indispensável a realização do curso de Geoestatística e divulgação de resultados preliminares em congressos.

Ao professor Adunias dos Santos Teixeira, pela grande contribuição à minha formação profissional, na forma de oportunidades proporcionadas, incentivo e altas expectativas, ao longo dos três anos em que fui sua orientada.

Ao Dr. Alípio Leão e a graduanda em Agronomia, Léa Costa, pela ajuda com a tabulação de dados.

Aos professores do departamento de Engenharia Agrícola da UFC: Claudivan Feitosa de Lacerda, José Carlos de Araújo, Marcus Lima Bezerra e Julien Pierre Burte, pelo apoio, incentivo e conhecimentos transmitidos.

Ao professor Ricardo Espíndola Romero do Departamento de Solos da UFC pelas importantes sugestões.

A Dra. Ana Célia Maia Meireles, Gilney Bezerra, Eurileny Lucas, Rogério Barbosa, Luiz Carlos, Odílio Coimbra, Dimas Oliveira, Clênio Jairo, Júlio César e José Firmino, pelo companheirismo e convivência amigável ao longo do curso.

As amigas Denise Silva, Sarah Farias e Rafaela Paula, pela segurança, por todas as alegrias divididas e por estarem ao meu lado nos momentos mais difíceis.

Muito obrigada!

*“Os testes da vida não são destinados a destruir você,
mas a construir você.”*

Norman Vincent Peale

RESUMO

O mapeamento das áreas de risco e o monitoramento são procedimentos que desempenham um papel decisivo no acompanhamento da salinidade, na previsão do processo de degradação e na fundamentação da tomada de decisões relativas ao uso sustentável ou às ações de recuperação dos solos. O objetivo principal deste estudo foi o mapeamento, com o uso de Geoprocessamento e de Estatística Multivariada, do risco de salinização dos solos do Estado do Ceará. Considerando que o processo de salinização é resultado da interação de diversos fatores, o referido mapa foi gerado tendo como base mapas de geologia, relevo, pedologia, clima, malha hídrica, uso e ocupação dos solos e qualidade da água. Uma categorização da influência das variações de cada fator foi desenvolvida com base na literatura específica e na opinião de especialistas em salinidade. Os mapas de risco foram gerados por três métodos: média aritmética simples, modelo elaborado por especialistas em salinidade e modelo desenvolvido com a Análise da Componente Principal - ACP. A eficiência dos modelos foi analisada por meio dos coeficientes de Exatidão Global, Exatidão Específica e de Kappa calculados com os dados da matriz de confusão. Esta, por sua vez, foi gerada para cada modelo a partir da comparação entre a classificação do risco e valores pontuais, georreferenciados, de condutividade elétrica do extrato de saturação dos solos. O mapeamento dos riscos segundo os três métodos mostrou que existe predominância do risco moderado à salinização na maior parte da área em estudo. A aplicação da média aritmética resultou em índice Kappa de 0,319, avaliando a classificação como razoável; já as estimativas segundo o modelo elaborado por especialistas e o desenvolvido com a ACP, resultaram em valores de Kappa de 0,403 e 0,465, respectivamente, sendo ambas as classificações avaliadas como boas. Segundo o modelo elaborado por especialistas, 45,17% dos solos da área estão sob risco de salinização alto ou severo. A aplicação do modelo desenvolvido com a ACP findou em resultado semelhante: 42,41% da área sob risco alto ou severo. Os mapas de risco de salinização de solos gerados para o Estado do Ceará podem ser utilizados como material auxiliar para a elaboração de zoneamentos, como também para o planejamento agroambiental e gestão em escala regional, indicando a necessidade de utilização adequada dos solos de modo a contribuir com a conservação e a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Palavras-chave: Salinidade. Sistemas de Informação Geográficas. Análise dos Componentes Principais.

ABSTRACT

Mapping risk areas plays a decisive role in monitoring soil salinity, predicting degradation processes and in support the decision-making concerning the sustainable use or the actions of soil remediation. The aim of this study was to map, using GIS and Multivariate Statistics, the risk of soil salinization in the State of Ceará. Whereas the salinisation process is the result of interaction between several factors, the risk map was generated based on maps of geology, topography, soil, climate, hydrological network, land uses and water quality. The influence of variations from each factor was categorized with support on specific literature and knowledge of experts in salinity. The risk maps were generated by three methods: simple arithmetic mean, model developed by experts and model developed with the Principal Component Analysis - PCA. The performance of the methods was analyzed by Global Accuracy, Specific Accuracy and Kappa Coefficient, all calculated by confusion matrix. This matrix was generated, for each model, from the comparison between the risk classes and georeferenced data of soil electrical conductivity. The three methods showed that there is a predominance of moderate risk of salinization in most of the study area. The application of arithmetic mean resulted in Kappa 0.319, which evaluates the classification as reasonable; the estimates according to the model developed by experts, and developed with the ACP, resulted in Kappa values of 0.403 and 0.465, respectively, and both classifications were evaluated as good. According to the model developed by experts, 45.17% of soils in the area are under high or severe risk of salinity. The application of the model developed with the ACP ended at a similar result: 42.41% of the area under high or severe risk. The risk maps of soil salinization generated for the State of Ceará can be used as supplementary material for zoning preparation, and also for agro-environmental planning and management on regional scale, indicating the need for appropriate land use in order to contribute to the conservation and sustainability of production systems.

Keywords: Salinity. Geographic Information Systems. Principal Component Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de Gestão de Risco (Adaptado de Feliciano (2008)).....	20
Figura 2 - Solo salino típico de formação a partir de depósitos marinhos no Colorado, EUA. (Fonte: University of Colorado).....	26
Figura 3 - Representação do processo de salinização nos horizontes superiores.....	29
Figura 4- Drenagem subsuperficial lateral em solo com camada impermeável.....	30
Figura 5 - Posição do Estado do Ceará no contexto regional e nacional e sua divisão político-administrativa em 184 municípios.....	39
Figura 6- Solos do Estado do Ceará digitalizado e adaptado a partir do mapa produzido por Jacomine et. al.(1973) (Fonte: Leão, 2010).	42
Figura 7- Regiões Hidrográficas do Estado do Ceará (COGERH, 2011)	45
Figura 8- Esquema da metodologia de trabalho.	47
Figura 9 - Litologia do Estado do Ceará (Adaptado de CPRM, 2003)	50
Figura 10 - Sequência metodológica para elaboração do mapa de Precipitação.....	54
Figura 11 - Localização dos Postos Pluviométricos no Estado do Ceará.....	55
Figura 12 - Sequência metodológica para elaboração do mapa Evapotranspiração.....	57
Figura 13- Localização das estações meteorológicas no Estado do Ceará.....	59
Figura 14 - Localização dos pontos de coleta de água, realizada pela COGERH, no Estado do Ceará.....	63
Figura 15- Esquema metodológico para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo do Ceará.....	64
Figura 16 - Imagens digitais com georreferenciamento ajustado.....	66
Figura 17 - Mosaico de imagens Landsat 5 compondo o território do Ceará	67
Figura 18 - Localização dos pontos de coleta de amostras de solos no Ceará	85
Figura 19 - Mapa de Risco de Salinização dos Solos referente ao critério geologia	87
Figura 20 - Classificação do relevo do Ceará conforme a altitude, em metros.	89
Figura 21 - Classificação do relevo do Estado do Ceará quanto aos valores percentuais de declividade (21a) e detalhamento do relevo da área do Maciço de Baturité (21b).	90
Figura 22 - Mapa de risco de salinização dos solos do Ceará referente ao	91
Figura 23 - Atualização da classificação dos solos do Estado do Ceará. (Aproximação do novo SiBCS, de acordo com a EMBRAPA (2006)), adaptado de Jacomine et al. (1973)	93
Figura 24 - Classificação dos solos do Estado do Ceará segundo as classes de drenagem, adaptado de Jacomine et al. (1973)	94
Figura 25 - Risco de salinização dos solos do Estado do Ceará, referente ao tema Pedologia, adaptado de Jacomine et al. (1973)	96
Figura 26 - Distribuição espacial da precipitação média anual no Ceará, obtidas por meio de krigagem segundo os modelos exponencial (26a); gaussiano (26b) e esférico (26c).	98
Figura 27 - Valores de REQM para os modelos usados na interpolação dos dados de Precipitação no Estado do Ceará.	99
Figura 28 - Distribuição espacial da precipitação no Ceará, em mm.ano ⁻¹ , segundo o modelo esférico.	100

Figura 29- Índice de Aridez para o Estado do Ceará conforme metodologia da UNESCO (1979); e respectivos riscos de salinização dos solos do Estado do Ceará quanto ao critério clima.....	104
Figura 30 - Risco de Salinização dos Solos referentes ao tema Malha hídrica.	106
Figura 31 - Distribuição espacial da CEa no Ceará, obtidas por meio de krigagem segundo os modelos exponencial (A); gaussiano (B) e esférico (C).....	108
Figura 32 - Valores de REQM para os modelos usados na interpolação dos dados de CEs no Estado do Ceará.	108
Figura 33 - Distribuição espacial da CEa no Ceará, em dS m ⁻¹ ; segundo o modelo gaussiano	109
Figura 34 - Distribuição espacial da qualidade das águas superficiais de acordo com Richards (1954) e seus respectivos riscos de salinização.	110
Figura 35 - Cobertura do solo do Estado do Ceará.....	111
Figura 36 - Risco de salinização dos solos do Ceará referente ao critério	114
Figura 37 - Mapa de Risco de Salinização dos Solos do Estado do Ceará segundo modelo aditivo.....	116
Figura 38 - Mapa de Risco de Salinização dos Solos do Estado do Ceará segundo modelo definido por Especialistas.....	119
Figura 39 - Mapa de Risco de Salinização dos Solos do Estado do Ceará segundo modelo elaborado pela Análise da Componente Principal.....	124
Figura 40 - Exatidão Específica para as classes de risco segundo modelos aplicados.	127

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades Geoambientais predominantes no Estado do Ceará	41
Tabela 2 - Tipos de solos do Estado do Ceará e suas respectivas classes de drenagem de acordo com Jacomine et al. (1973).....	53
Tabela 3 - Classes de clima de acordo com o índice de aridez	60
Tabela 4- Especificações das cenas obtidas pelo satélite LandSat TM5 utilizadas para determinação do uso e ocupação do solo do Ceará	65
Tabela 5 - Classes de interesse nas cenas do satélite LANDSAT-5 em diferentes combinações de bandas no espaço RGB	69
Tabela 6 - Qualidade da classificação associada aos valores da estatística Kappa	71
Tabela 7 -Notas de risco de salinização e suas respectivas classificações.	71
Tabela 8 - Classes litológicas e suas respectivas notas de risco de salinização	73
Tabela 9 - Classes declividade e notas de risco de salinização do solo.....	74
Tabela 10- Tipos de solos do Ceará, classes de drenagem e notas de risco de salinização.	75
Tabela 11 - Índice de Aridez e risco de salinização do solo.....	76
Tabela 12 - Segmentos da rede de drenagem, distâncias do centro do rio e suas respectivas notas de risco de salinização de solo.....	76
Tabela 13- Classes de água e risco de salinização conforme Richards (1954) e respectivas notas de risco de salinização.	77
Tabela 14 - Classes de Uso e Ocupação do Solo e suas respectivas notas de risco de salinização de solo	77
Tabela 15 - Intervalo de validade do teste KMO, para aplicação no modelo de análise fatorial.....	81
Tabela 16- Classes de Risco de Salinização de acordo com CEes em $dS m^{-1}$	86
Tabela 17 - Distribuição absoluta e percentual dos tipos de relevo do Estado do Ceará em função da declividade.	90
Tabela 18- Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará em função do Relevo.....	92
Tabela 19 - Estatísticas descritivas da precipitação pluviométrica anual em 148 postos no Estado do Ceará.	97
Tabela 20- Modelos de semivariogramas e parâmetros ajustados aos dados de precipitação pluviométrica no Estado do Ceará	97
Tabela 21 - Estatísticas descritivas da CEa em 126 pontos de coleta de água.	107
Tabela 22 - Modelos de semivariogramas e parâmetros ajustados aos dados de CEa no Estado do Ceará	107
Tabela 23 - Distribuição absoluta e percentual das classes de Uso e Ocupação dos Solos do Estado do Ceará	112
Tabela 24 - Matriz de confusão para avaliação da classificação não supervisionada, método Isodata, do mosaico de imagens Landsat abrangendo o Estado do Ceará.....	113
Tabela 25- Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará em função de seu Uso e Ocupação.....	115

Tabela 26- Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará segundo modelo aditivo.	117
Tabela 27- Matriz de confusão para avaliação do mapa de Risco de Salinização dos Solos segundo Modelo Média Aritmética	118
Tabela 28 - Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará segundo modelo definido por Especialistas.	120
Tabela 29 - Matriz de confusão para avaliação do mapa de Risco de Salinização dos Solos segundo Modelo definido por Especialistas.	121
Tabela 30 - Matriz de cargas fatoriais das variáveis nas quatro componentes principais para o Estado do Ceará.	122
Tabela 31 - Pesos (π) a serem associados aos indicadores de salinização	123
Tabela 32 - Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará segundo modelo elaborado pela ACP.	125
Tabela 33- Matriz de confusão para avaliação do mapa de Risco de Salinização dos Solos segundo a ACP	126
Tabela 34 - Exatidão Global (EG) e Qualidade do mapa segundo índice Kappa	127

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. Geral.....	18
2.2. Específicos.....	18
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	19
3.1. Análise de risco.....	19
3.2. Salinidade do solo.....	22
3.2.1. Considerações gerais.....	22
3.2.2. Origem dos sais.....	24
3.2.3. Processos de salinização dos solos.....	26
3.2.4. Classificação e caracterização dos solos afetados por sais.....	31
3.3. Geoprocessamento aplicado aos estudos da salinidade.....	33
3.4. Estatística multivariada.....	36
3.4.1. Considerações gerais.....	36
3.4.2 Análise das componentes principais.....	37
4. ÁREA DE ESTUDO.....	39
4.1. Localização geográfica e caracterização geral.....	39
4.2. Caracterização fisiográfica.....	40
4.2.1. Geologia e geomorfologia.....	40
4.2.2. Solos.....	41
4.3. Caracterização hidroclimatológica.....	43
4.3.1. Aspectos climáticos.....	43
4.3.2. Recursos hídricos.....	44
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	47
5.1. Elaboração dos mapas.....	47
5.1.1. Geologia.....	48
5.1.2 Relevo.....	51
5.1.3 Pedologia.....	52
5.1.4 Clima.....	53
5.1.4.1 Precipitação atmosférica.....	54
5.1.4.2. Evapotranspiração.....	57
5.1.4.3 Índice de aridez.....	59
5.1.5. Malha hídrica.....	60

5.1.6. Qualidade da água	62
5.1.7. Uso e ocupação do solo	64
5.2. Categorização do risco	71
5.3. Classificação dos mapas quanto ao risco	71
5.3.1. Geologia	72
5.3.2. Relevo	74
5.3.3. Pedologia	74
5.3.4. Clima	75
5.3.5. Malha hídrica	76
5.3.6. Qualidade da água	77
5.3.7. Uso e ocupação do solo	77
5.4. Risco de salinização	78
5.4.1. Média aritmética simples	79
5.4.2. Modelo definido por especialistas	79
5.4.3. Emprego da Análise da Componente Principal	80
5.4.3.1. Conformação dos dados iniciais	80
5.4.3.2. Análise de consistência dos dados	80
5.4.3.3. Elaboração da matriz de cargas fatoriais	82
5.4.3.5. Elaboração do índice risco de salinização	83
5.4.4. Validação dos mapas de risco de salinização	84
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	87
6.1. Geologia	87
6.2. Relevo	88
6.2. Pedologia	92
6.4. Precipitação Atmosférica	96
6.5. Evapotranspiração	100
6.6. Índice de aridez	103
6.7. Malha hídrica	105
6.8. Qualidade da água	106
6.9. Uso do solo	111
6.10. Índice Risco de Salinização	116
6.10.1. Média aritmética simples	116
6.10.2. Modelo definido por especialistas	118
6.10.3. Emprego da Análise da Componente Principal	121
6.10.3.1 Análise de componentes principais	121

6.10.3.2. Risco de salinização dos solos por ACP.....	123
6.10.4. Comparação entre os modelos para o índice de Risco de Salinização	126
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
8 REFERÊNCIAS	131
APÊNDICES	143

1. INTRODUÇÃO

O solo desempenha uma grande variedade de funções vitais, de caráter ambiental, social e econômico, consistindo um elemento único para o desenvolvimento das atividades humanas. Por ser um recurso finito e limitado, e face às suas taxas de degradação potencialmente rápidas em relação às suas taxas de formação e regeneração extremamente lentas, a necessidade de proteger o solo como recurso essencial é indiscutível.

A salinização, um dos processos de degradação dos solos, vem crescendo rapidamente em diversas partes do globo sendo os seus efeitos prejudiciais mais pronunciados nas regiões áridas e semiáridas. Os processos de salinização ocorrem por diferentes causas, sejam naturais sejam desencadeadas por ações antrópicas, tais como clima, condições geológicas, cheias e prática indiscriminada da irrigação e da aplicação de fertilizantes. O fenômeno causa limitações significativas da produção agrícola devido, principalmente, a diminuição do potencial osmótico do solo e à toxidez resultante da concentração de íons específicos, e consiste em um dos mais importantes problemas de degradação ambiental podendo, inclusive, ser precursor da desertificação.

O mapeamento das áreas de risco e o monitoramento são procedimentos que desempenham um papel decisivo no acompanhamento da salinidade, na previsão do processo de degradação e na fundamentação da tomada de decisões relativas ao uso sustentável ou às ações de recuperação dos solos (EVANS et al., 1995). O mapeamento de áreas de risco consiste, basicamente, na identificação e categorização da propensão das áreas a serem lesadas por agentes naturais e/ou antrópicos. Já o monitoramento da salinização significa primeiro identificar os locais onde ela ocorre e então detectar as mudanças temporais e espaciais desta ocorrência (KHAIER, 2003).

O geoprocessamento pode ser entendido como a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para tratar dados georreferenciados, e as ferramentas utilizadas para realizá-lo compõem um conjunto denominado Sistemas de Informações Geográficas (SIG). A utilização do Geoprocessamento torna possível a coleta, a análise e a disponibilização de informações produzidas e visa maior facilidade, segurança e agilidade nas atividades referentes ao monitoramento, planejamento e gestão do espaço geográfico. Essas características fazem do Geoprocessamento uma tecnologia cada vez

mais utilizada em diversos campos de estudo, incluindo a agricultura, o meio ambiente e os recursos naturais.

Diversos autores têm reportado que a utilização de informações obtidas através de geoprocessamento pode prever atributos dos solos assim como mapeá-los de maneira menos onerosa e mais rápida do que as convencionais (BROWN et al., 2006). A integração de dados obtidos por sensoriamento remoto, sob a forma de imagens de satélite, em SIG, impulsionou a capacidade de delineamento e mapeamento da salinidade do solo e o uso da técnica tem boas indicações de sua exatidão, relação custo/benefício, rapidez e economia (AL-MULLA, 2010).

A denominação “Análise Multivariada” corresponde a um grande número de métodos e técnicas que utilizam simultaneamente múltiplas variáveis na interpretação teórica de um conjunto de dados, sendo, portanto, ferramentas estatísticas que apresentam uma visão abrangente do fenômeno avaliado (EVERITT & DUNN, 1991). Por ser um processo desencadeado por diferentes causas, o fenômeno da salinização dos solos é complexo e seu estudo exige que vários fatores sejam considerados. Assim, o emprego da estatística multivariada pode contribuir significativamente por possibilitar a análise simultânea de múltiplos fatores, qualitativos ou quantitativos, correlacionados ou não, bem como a determinação da influência ou importância de cada um deles (CORRAR et al., 2007).

Diante do contexto apresentado, foram traçados os objetivos deste trabalho.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

O objetivo principal deste estudo é produzir um mapa, com a aplicação de Geoprocessamento, do risco de salinização dos solos do Estado do Ceará, que ofereça elementos potenciais ao suporte do monitoramento da qualidade dos solos e subsídios para tomadas de decisão relativas a políticas de gestão territorial da região.

2.2. Específicos

1. Elaborar mapas de Relevo, Clima, Malha Hídrica, Qualidade da Água e Usos dos Solos para o Estado do Ceará;

2. Avaliar o desempenho do interpolador krigagem, a partir do melhor modelo de semivariograma, para espacialização de dados de precipitação, evapotranspiração e condutividade elétrica da água do Estado do Ceará;

3. Elaborar mapas de risco de salinização de solos do Estado do Ceará quanto aos fatores Geologia, Relevo, Pedologia, Clima, Malha Hídrica, Qualidade da Água e Usos dos Solos;

4. Aplicar a técnica de Análise da Componente Principal para a definição do grau de importância, na forma de “pesos”, dos diferentes mapas de risco de salinização elaborados;

5. Desenvolver um Índice de Risco de Salinização dos solos com emprego da Análise da Componente Principal;

6. Elaborar mapas de risco de salinização de solos do Estado do Ceará segundo a média aritmética simples e modelo definido por especialistas em salinidade dos solos;

7. Avaliar os mapas de risco de salinização dos solos produzidos, com uso de resultados de análises químicas de solos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Análise de risco

Em um momento no qual a sociedade mundial vive um clima generalizado de insegurança, tanto em função da violência cotidiana, das epidemias e das crises financeiras, quanto pelas possíveis ameaças atreladas às mudanças ambientais globais, no Brasil a sociedade parece alheia à ocorrência de ameaças, sejam elas oriundas de eventos naturais ou induzidos. Almeida & Pascoalino (2009) apontam que por um conjunto de fatores o Brasil não desenvolve gestão de risco, mas gestão de crise.

Para Bui (1997), o conceito de risco (*risk*) refere-se à possibilidade e/ou probabilidade de ocorrência de um evento danoso, enquanto o perigo (*hazard*) refere-se a uma fonte causadora de prejuízos que pode atuar de imediato. Assim, o risco é algo potencial (exprime possibilidade) e o perigo, algo iminente (está em via de efetivação próxima).

Nesse sentido, a gestão de risco é a gestão da possibilidade de ocorrência de um evento perigoso, ou seja, essa perspectiva abrange a gestão de algo que não aconteceu e requer a sua previsão e prevenção. Assim, a identificação, a qualificação e, quando possível, a quantificação dos riscos passa a ser objeto da preocupação política e da análise científica (VIEIRA, 2005).

Avaliar riscos e determinar a melhor maneira de geri-los constitui um desafio dado às dificuldades de ponderar todos os aspectos que o envolvem e visualizar todas as consequências de uma medida de controle, uma vez que existe sempre certo grau de incerteza.

De acordo com Antoine (2008), a gestão de riscos (naturais ou não) é uma prática inerente ao surgimento do homem na Terra. Mesmo de forma inconsciente, comunidades primitivas analisavam e modificavam o ambiente no sentido de adaptá-lo às suas necessidades e de evitar danos e prejuízos causados por fenômenos naturais; mas quando se considera a gestão de risco como meio de reduzir as ameaças e suas consequências, se trata então de um fenômeno relativamente mais recente, que remonta às grandes “civilizações hidráulicas”, como China, Índia, Mesopotâmia ou Egito, ao construírem diques contra as inundações milênios atrás.

Ainda de acordo com Antoine (2008), no século XIX, a proteção baseada no princípio da gestão integrada na escala da bacia hidrográfica presumia uma erradicação

dos riscos naturais. Já no século XX, houve uma conscientização da necessidade de outras formas de gestão: previsão, prevenção, gestão, mitigação, reparação e monitoramento. Atualmente, a gestão de risco recobre uma série de políticas, medidas, dispositivos, incluindo a previsão e a prevenção dos riscos.

A avaliação de risco ambiental envolve a análise sistemática das informações disponíveis para identificar perigo e estimar os riscos ao meio ambiente. A Figura 1 ilustra um modelo apresentado por Feliciano (2008), segundo o qual a Gestão de Riscos deve sempre envolver as seguintes etapas:

- Análise de Risco: indicará a ordem de magnitude do risco. Envolve a identificação do Perigo e a estimativa do Risco;
- Avaliação de Risco: constitui-se em um processo que utiliza os resultados da análise de risco para a tomada de decisão quanto ao gerenciamento de risco, através da comparação com critérios de tolerabilidade previamente estabelecidos;
- Gerenciamento de Risco: é a formulação e implantação de medidas e procedimentos técnicos e administrativos que têm por finalidade prevenir, controlar ou reduzir os riscos existentes.

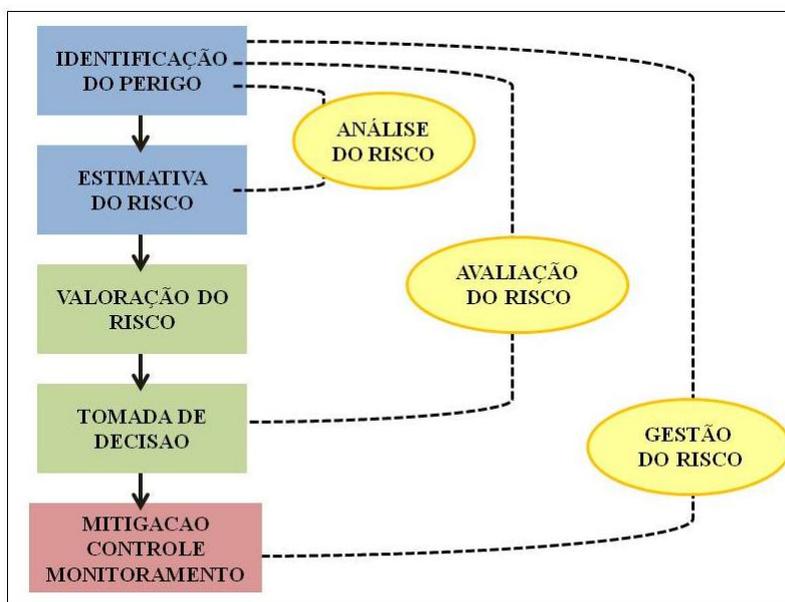


Figura 1 -Modelo de Gestão de Risco (Adaptado de Feliciano (2008)).

Como um exemplo de análise de risco, pode-se citar o trabalho de Wiebe et al. (2011) que desenvolveram um indicador para avaliar o impacto da mudança dos usos da

terra, entre os anos de 1981 e 2006, sobre o risco de salinização dos solos nas planícies canadenses. Os autores estimaram o risco combinando pesos aos fatores que controlam ou influenciam o processo de salinização: estado da salinidade do solo (compilação de dados de análises químicas), topografia, drenagem do solo, clima e uso da terra. Os quatro primeiros factores foram considerados constantes ao longo do tempo, enquanto as mudanças no uso da terra foram consideradas como responsáveis pelas alterações do índice. Uma ponderação para cada fator foi desenvolvida com base na literatura específica e na opinião de especialistas em salinidade e os valores do índice foram divididos em cinco classes de risco. O indicador do Risco de Salinização dos Solos (RSS) foi calculado para as regiões agrícolas de Manitoba, Saskatchewan e Alberta. Os resultados mostraram que a maioria das terras em risco de salinização do solo está na região mais árida de Saskatchewan e Alberta; apesar de que Manitoba, com um clima mais úmido, também apresentou áreas significativas com alto risco natural para a salinização devido à topografia relativamente plana, drenagem pobre, bem como extensas regiões com águas subterrâneas próximas da superfície. Os autores observaram um declínio das áreas sob risco de salinização no período analisado e atribuíram a melhoria à diminuição da prática do pousio de verão e ao aumento na área de cobertura vegetal permanente; assim, puderam fazer recomendações visando o controle e redução dos riscos existentes (como o cultivo de forrageiras perenes evitando deixar o solo exposto, plantio de faixas de árvores para reduzir o fluxo de águas subterrâneas para as áreas de risco, recuperação de áreas desmatadas com vegetação nativa permanente), bem como alertar as agências governamentais quanto a relevância de se incentivar tais atividades.

3.2. Salinidade do solo

3.2.1. Considerações gerais

A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação define os solos salinos como aqueles que contêm quantidades consideráveis de sais solúveis a ponto de impedir o crescimento das culturas (FAO, 2000a).

A salinização é considerada um dos principais e mais difundidos problemas ambientais que limitam a produção vegetal e diminuem a capacidade produtiva do solo, consistindo um grave processo de degradação que pode levar à desertificação (GHASSEMI, 1991; QADIR et al., 2000; JORENUSH&SEPASKHAH, 2003; SHRESTHA et al., 2005; SHRESTHA, 2006).

O problema de salinização do solo é mais difundido nas regiões áridas e semiáridas, onde as condições climáticas para a produção agrícola são adversas devido às baixas taxas de precipitação e elevadas taxas de evapotranspiração (FAO, 2000a). Geralmente nestas regiões são comuns as políticas que promovem a intensificação da produção agrícola (ABROL et al., 1988; GREINER, 1997; PEDREÑO et al., 2007; FARIFTEH et al., 2006) na qual a irrigação é essencial para garantir o suprimento das crescentes demandas. Essa intensificação, se não planejada adequadamente, resulta em práticas inapropriadas de manejo da água e do solo que podem levar e/ou acelerar os processos de salinização.

O problema, no entanto, também ocorre em climas úmidos e sub-úmidos, principalmente nas regiões costeiras, devido à intrusão da água do mar através de estuários e águas subterrâneas (ABROL et al., 1988) como também pela ação dos ventos.

Buringh (1979) estimou, a partir de vários dados disponíveis, que ao fim da década de 1970, o mundo perdia pelo menos dez hectares de terra arável por minuto, sendo três hectares perdidos devido à salinização do solo. Segundo Abrol et al. (1988):

“O problema é de urgência avassaladora. O custo para a recuperação aumenta rapidamente até tornar-se economicamente inviável. Quase cinquenta por cento das terras irrigadas em regiões áridas e semiáridas têm algum grau de salinização do solo. Isto

indica a magnitude do problema que deve ser abordado a fim de satisfazer as futuras necessidades mundiais de alimentos.”

Há extensas áreas de solos afetados por sais em todos os continentes mas a sua extensão e distribuição mundial não foram estudadas em detalhe e variam de acordo com as fontes de dados. A primeira tentativa de compilar informações sobre a extensão de solos afetados por sais em uma base mundial foi feita por Massoud, em 1974, tendo como base o mapeamento global de solos da FAO/Unesco, e reportada por Abrol et al. (1988) segundo os quais 932 milhões de hectares são afetados por sais, com 38,4% ocorrendo na Austrália, 33,9% na Ásia, 15,8% nas Américas, 8,6% na África, e 3,3% na Europa. Já segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO, 2000b), a superfície global afetada por sais é de 831 milhões de hectares, sendo 397 milhões de hectares de solos salinos e 434 milhões de hectares de solos sódicos. Outras estimativas aproximam-se de 1 bilhão de hectares, o que representa cerca de 7% da área continental (GHASSEMI et al., 1995).

De acordo com a avaliação global da degradação do solo induzida pelo homem realizada pelo projeto GLASOD (*Global Assessment of Soil Degradation*) no final de 1980, além das áreas naturalmente afetadas, 76,3 milhões de hectares foram salinizados como consequência das atividades humanas (OLDEMAN et al., 1991). A maior proporção de solos que sofrem salinização secundária é encontrada na Ásia (69% da área global), seguida pela África, América, Europa e Austrália (FAO, 2000b). Em média, 20% das terras irrigadas do mundo são afetadas por sais (45 milhões de hectares dos 230 milhões de hectares irrigados no mundo), mas este número aumenta para mais de 30% em países como Egito, Irã e Argentina (GHASSEMI et al., 1995). Dos quase 1,5 bilhões de hectares de agricultura de sequeiro, 32 milhões de hectares (2,1%) são afetados por sais (FAO, 2000b).

Não há dados recentes sobre a salinização do solo em termos mundiais, mas pode-se supor que, uma vez que os dados compilados datam das décadas de 1970 e 1980, a expansão da salinização provavelmente excede a expansão de áreas recuperadas (METTERNICHT & ZINCK, 2009).

No Brasil, solos salinos e sódicos ocorrem no Rio Grande do Sul, no Pantanal Mato-Grossense, em regiões costeiras sob influência marinha e, predominantemente, na região semiárida do Nordeste (RIBEIRO, 2010). Segundo Ribeiro et al. (2003), com

base no Mapa de Solos do Brasil, os solos salinos, solódicos e sódicos ocupam cerca de 16 milhões de km² ou 2% do território nacional.

No Nordeste brasileiro, de acordo com revisão baseada no levantamento de solos da Bahia ao Ceará, totalizando 1.110.000 km² na escala de 1:500.000, foram delimitadas áreas correspondentes a 85.931 km² de solos afetados por sais, representando 7,74% da área mapeada destes Estados, isto sem considerar as áreas com problemas de sais e sódio dos perímetros irrigados e solos aluvionais dos rios (PEREIRA, 1983 apud CORDEIRO & MANSEFU, 2001). Já as estimativas feitas por Pereira et al. (1986) e citadas por Ribeiro (2010) relacionam uma área de mais de 9 milhões de hectares de solos afetados por sais no Nordeste do Brasil.

Goes (1978) inferiu sobre a salinização e os problemas de drenagem em áreas irrigadas da região Nordeste concluindo que 25% do total implantado estão salinizados, percentagem esta considerada bastante otimista quando levantamento posterior, realizado por Cordeiro et al. (1988), nos solos do projeto de irrigação de São Gonçalo na Paraíba mostrou que só na área em operação 24% estão afetados por sais, isto sem considerar as áreas já abandonadas que apresentam elevados teores de sais e/ou sódio trocável. Esta situação reflete-se de maneira geral nos projetos de irrigação implantados no Nordeste onde extensas áreas estão fora de operação por apresentarem condições adversas ao desenvolvimento e produção rentável das culturas (CORDEIRO, 2001). Conforme o Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS, 1991) a área afetada por salinidade nos diversos perímetros irrigados sob sua jurisdição varia de 3 a 29,4% da superfície agrícola útil, sendo que no Nordeste a percentagem média é de 7,8% que corresponde a 2.000 hectares.

3.2.2. Origem dos sais

Ossais mais frequentemente encontrados nos solos halomórficos constituem-se principalmente dos cátions sódio, cálcio e magnésio, e dos ânions cloreto e sulfato. Nesses solos, com menos frequência, encontram-se outros íons como potássio, carbonato, bicarbonato e nitrato (USSL STAFF, 1954).

A origem e, em certa medida, a fonte direta de todos os sais são os minerais primários contidos nas rochas e/ou expostos na superfície terrestre. Com o

intemperismo químico, que envolve processos como hidrólise, hidratação, solução, oxidação e carbonatação, esses minerais são gradualmente liberados e fazem-se solúveis. Os sais recém formados raramente permanecem nos locais de origem exceto em regiões secas onde, apesar do intemperismo ser normalmente lento, os horizontes de solos salinos podem se formar acima da zona de intemperismo das rochas por conta dos baixos índices pluviométricos (USSSL STAFF, 1954).

Os sais liberados pelo processo de intemperização das rochas geralmente são transportados para longe de sua fonte de origem, podendo ser carregados para horizontes inferiores mediante percolação ou levados a lugares distantes por escoamento superficial e/ou subterrâneo. Como a água se move dos sítios mais úmidos para os mais secos, os sais são carregados e sua concentração tende a aumentar podendo atingir condição suficiente para provocar a precipitação dos sais de baixa solubilidade (ABROL et al., 1988).

Os sais são então redistribuídos na cobertura do solo de acordo com sua solubilidade nas condições climáticas, topográficas e hidrológicas predominantes. Quando percolados, os sais são depositados nas águas sub superficiais podendo, por capilaridade, acumular-se na superfície do solo a medida em que a água for evaporada ou consumida pelas plantas. Já o transporte dos sais para longe do material de origem pela ação dos escoamentos é responsável pela deposição e acumulação de grandes quantidades de sais em rios, mares, açudes, lagoas ou em terrenos localizados em depressões, onde atuam como reservatórios no ciclo dos sais na terra (METTERNICHT & ZINCK, 2009).

Em regiões úmidas, por se tratar de zonas com precipitações elevadas, os sais são lixiviados até a zona freática ou eliminados através do escoamento superficial. Já em regiões de clima árido e semiárido, por apresentarem déficit hídrico na maior parte do ano e, na maioria das vezes, os solos serem rasos ou apresentarem camadas impermeáveis, a água que contém sais fica sujeita aos processos de evaporação ou evapotranspiração, podendo atingir, com o tempo, níveis comprometedores para o crescimento e desenvolvimento das plantas (DIAS, 2004).

Como os materiais geológicos variam amplamente em sua composição química, alguns materiais apresentam conteúdos mais elevados em sais do que outros (ABROL et al., 1988). Esta é a razão pela qual os oceanos podem também ser a fonte de sais em solos cujo material de origem são os depósitos marinhos que foram estabelecidos durante os primeiros períodos geológicos. Os solos salinos que ocorrem no Colorado

(Figura 2), Wyoming, e Utah, nos Estados Unidos, são exemplos típicos de solos formados a partir de formações geológicas marinhas (USSL STAFF, 1954).



Figura 2 -Solo salino típico de formação a partir de depósitos marinhos no Colorado, EUA. (Fonte: University of Colorado).

Embora o intemperismo de minerais primários seja a fonte primária e direta de todos os sais presentes no solo, são raros os exemplos em que esta fonte tenha formado diretamente os solos salinos. A gênese de solos salinos (halomórficos) está associada tanto com a formação geológica predominante na paisagem como com a drenagem, uma vez que esses solos geralmente se formam em áreas que recebem sais de outras localidades e tem a água como principal carreadora. O homem, como eterno modificador de ambientes, contribui decisivamente para acelerar ou diminuir o processo (ABROL et al., 1988).

3.2.3. Processos de salinização dos solos

Os solos afetados por sais, também conhecidos por solos halomórficos ou solos salinos e sódicos, são solos geralmente desenvolvidos em condições imperfeitas de drenagem, que se caracterizam pela presença de sais solúveis, sódio trocável ou ambos, em horizontes ou camadas próximas a superfície (RIBEIRO, 2010).

Os solos halomórficos geralmente se localizam em áreas baixas para onde convergem os sais das áreas circunvizinhas, estando a salinização relacionada com

condições de restrição de drenagem, envolvendo lençol freático alto ou baixa permeabilidade que impedem a lavagem dos sais em profundidade, e com climas áridos e semiáridos cuja evapotranspiração elevada favorece a ascensão capilar dos sais para a superfície (USSL STAFF, 1954; SOMMERFELDT & RAPP, 1978 apud RIBEIRO, 2010).

O processo de salinização consiste na concentração de sais mais solúveis que o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), cuja solubilidade é de $2,41 \text{ g L}^{-1}$, nos horizontes ou camadas do perfil de solo. Os principais sais solúveis encontrados nos solos salinos são cloretos, sulfatos e bicarbonatos de Na, Ca e Mg. Em menor quantidade podem ocorrer potássio (K^+), amônio (NH_4^+), nitratos (NO_3^-) e carbonatos (CO_3^{2-}) (RIBEIRO, 2010). Ainda segundo Ribeiro (2010), o processo de solonização promove a formação de solos sódicos, e é constituído por dois subprocessos: sodificação e dessalinização. A sodificação, primeira etapa, é o processo de passagem do íon Na^+ da solução do solo para o complexo de troca, formando os solos denominados de salino-sódicos, enquanto a dessalinização, etapa final, promove a lavagem dos sais solúveis, resultando na formação de solos unicamente sódicos.

Esses processos podem ser conduzidos por diferentes causas e, em termos gerais, podem ser classificados como primários, ou seja, resultantes de processos naturais, e secundários, onde as atividades humanas desempenham um papel central (CASTANHEIRA, 2010).

Em condições naturais, a presença e concentração de sais na superfície e/ou camadas do solo são controladas por fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos e hidrológicos (METTERNICHT & ZINCK, 2009).

O processo de salinização natural ou salinização primária pode ser desencadeado por várias causas, podendo ser destacadas como mais importantes:

a) Clima: o clima da região atua como um dos fatores mais importantes no processo de salinização (USSL STAFF, 1954). Conforme Cruz & Melo (1974) citados por Silva Júnior et al. (1999), alguns fatores são responsáveis pela salinização das águas subterrâneas do cristalino do Nordeste brasileiro, entre eles o processo de concentração por evaporação, observando-se relação direta entre o índice de aridez e o grau de salinização das águas; assim, a concentração total de sais varia de acordo com o zoneamento árido. Em geral, quanto mais elevadas são as temperaturas, maior a evapotranspiração potencial e maior a redução da umidade na superfície do solo. Com o

decréscimo da umidade na superfície do solo a tendência é que ocorra ascensão por capilaridade da água contendo sais existentes no próprio perfil e a acumulação dos mesmos em camadas superficiais (RIBEIRO, 2010). Em áreas vegetadas os sais são acumulados na zona radicular à medida que as plantas consomem por evapotranspiração grande parte da água armazenada, ficando quase todos os sais em volumes cada vez menores da água remanescente no solo (AYERS & WESTCOT, 1985). Ainda segundo Ayers & Westcot (1985), o clima é o fator que influi na tolerância das plantas à salinidade e à estiagem. Normalmente em climas frios, além da demanda de água pela vegetação ser menor, é possível que a água das chuvas e parte da água utilizada em irrigações lixiviem os sais acumulados. Estudos realizados sobre a composição química das águas do cristalino no nordeste brasileiro concluíram que o clima, especificamente o índice de aridez local, exerce influência sobre o teor de salinidade total das águas, cujos níveis altos de salinidade são associados aos elevados índices de aridez (SILVA JÚNIOR et al., 1999).

b) Influência dos mares e oceanos: o mar é também fonte de sais em solos localizados em baixas altitudes ao longo da linha costeira, seja pela submersão regular devido à maré alta, seja pelo carreamento dos sais pela ação dos ventos. Os manguezais, ecossistemas costeiros de transição entre os ambientes terrestre e marinho, estão sujeitos ao regime das marés sendo regularmente submersos na maré alta e descobertos na maré baixa, ocasião em que os sais se concentram. Nestes ambientes estuarinos, os eletrólitos da água do mar causam a floculação (deposição) dos sedimentos finos (silte e argila) transportados pelos rios, e estes eletrólitos permanecem fixos sobre as partículas floculadas (METTERNICHT & ZINCK, 2009). Os sais podem também acumular-se em aquíferos interdunares e eventualmente, em áreas costeiras onde a extração excessiva de água causa o abaixamento do nível do lençol freático, a água do mar pode substituir a água subterrânea que for sobre-explorada, processo conhecido como “intrusão de água salgada” (IANNETTA & COLONNA, 2006). Os sais podem ainda ser carreados para o interior pela ação dos ventos ao entrar em contato com o rebentar das ondas nas praias ou aflorações rochosas; segundo Teakle (1937) citado pela USSL STAFF (1954) esses são os chamados sais cíclicos. Este tipo de salinização primária, através de aerossóis marinhos, pode afetar áreas localizadas relativamente longe da linha costeira, como é o caso da Austrália Ocidental, onde se acredita que os sais acumularam-se no interior pela ação dos ventos ao longo de milhões de anos (AUSTRALIAN NATIONAL LAND

AND WATER RESOURCES AUDIT, 2000). Este processo ocorre ao longo da costa brasileira, estando relacionado com áreas de mangues e várzeas, localmente denominadas de salgados ou apicuns (RIBEIRO, 2010).

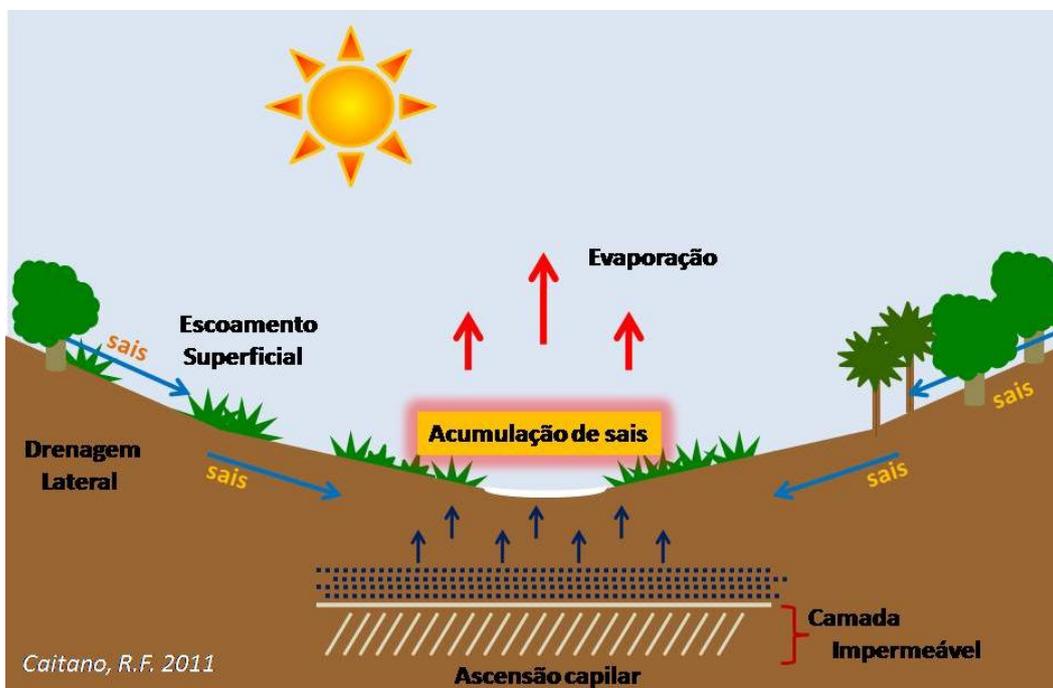


Figura 3 - Representação do processo de salinização nos horizontes superiores do solo; processo típico no semiárido (Adaptado de Ribeiro (2010)).

c) Drenagem restrita: acumulação de sais provenientes de áreas circunvizinhas, por escoamento superficial e drenagem lateral, nos horizontes superiores de áreas rebaixadas, devido a presença de estratos impermeáveis em pequena profundidade (Figura 3). Nessas áreas de baixada, também chamadas “bacias fechadas”, o escoamento da água contendo sais dissolvidos converge em direção a depressões, onde a alta temperatura faz com que a água evapore e os sais precipitem. Este processo é típico de áreas onde a evaporação potencial excede o influxo de água e, durante longos períodos de seca podem se formar crostas de sais na superfície (METTERNICHT & ZINCK, 2009). Esta é a principal causa de salinização no semiárido nordestino, ocorrendo geralmente em áreas baixas constituídas por Neossolos Flúvicos, Planossolos, Vertissolos, Gleissolos ou outros solos relacionados com planícies aluviais ou áreas deprimidas (RIBEIRO, 2010). A baixa permeabilidade do solo causada pela textura e/ou estrutura desfavorável ou pela presença de camadas compactadas e/ou impermeáveis impede o movimento descendente da água (ABROL et al., 1988). De Sigmond (1924)

citado por Abrol et al. (1988), constatou que a presença de uma camada impermeável no solo é essencial para a formação dos solos salinos encontrados na Hungria.

d) Topografia: topografias acidentadas e as variações geológicas facilitam a formação de aquíferos confinados e represamentos (CORDEIRO, 2001). É assim que ocorre a acumulação dos sais em áreas baixas e sopés de encosta em consequência da drenagem subsuperficial lateral das posições mais altas. É a salinização típica das posições de terço inferior de encostas em regiões semiáridas, muito comum nas áreas de Luvisolos e Planossolos do semiárido nordestino (Figura 4) (RIBEIRO, 2010).

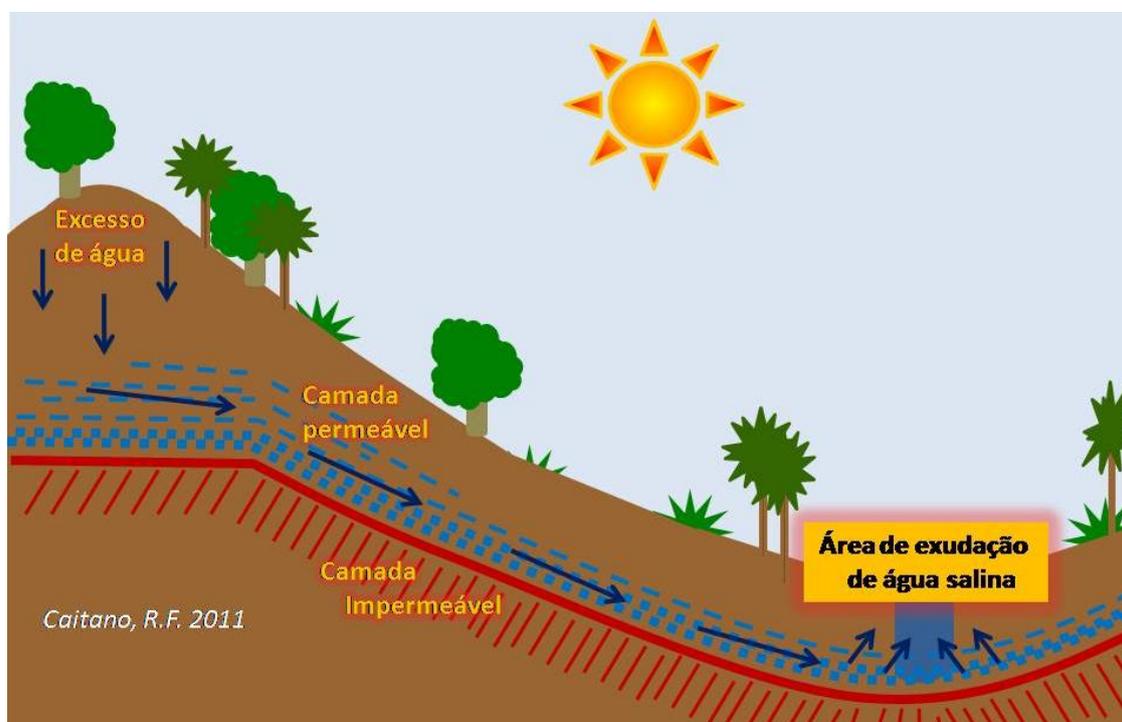


Figura 4 -Drenagem subsuperficial lateral em solo com camada impermeável (Adaptado de Ribeiro (2010)).

A importância econômica do problema da salinidade surge quando solos antes não salinos passam a ser afetados por sais devido às ações antrópicas. O processo de salinização secundário ou induzido ocorre em consequência das seguintes causas:

- a) Deposição dos sais pela água de irrigação contendo sais em solução;

b) Elevação dos sais à superfície por ascensão do lençol freático, em virtude do manejo inadequado da irrigação (infiltrações de água a partir de canais e reservatórios com problemas no revestimento, distribuição irregular da água de irrigação ou superirrigação com ausência de drenagem);

c) Uso de fertilizantes e corretivos: a aplicação de fertilizantes de forma intensa ou pouco parcelada ao longo do ciclo cultural, nomeadamente na agricultura intensiva em terrenos com baixa permeabilidade e possibilidades de lixiviação reduzidas;

d) Sistemas de gestão das terras e a degradação das mesmas: o desmatamento é um dos principais fatores de degradação ambiental e também da salinização dos solos, especialmente em regiões de clima árido e semiárido onde as taxas evaporação serão potencializadas o que leva ao incremento de sais no solo.

Em todos os casos, naturais ou induzidos, o processo de salinização envolve o excesso de água e, geralmente, evapotranspiração elevada.

3.2.4. Classificação e caracterização dos solos afetados por sais

A salinidade representa a ação dos sais dissolvidos na solução do solo e ocorre, basicamente, pelas suas interações eletroquímicas com as argilas. A intensidade desse fenômeno depende da natureza da argila e do cátion presente na solução. A caracterização principal desse efeito é a expansão da argila quando úmida e a contração quando a água é evaporada, absorvida pelas plantas ou lixiviada. Quando a expansão ou a contração é expressiva pode ocorrer fragmentação dos agregados provocando a dispersão da argila e o traumatismo radicular das culturas (HOLANDA, 2000).

A sodicidade ou alcalinidade relaciona-se à ação dos sais aos solos prejudicando a estrutura, a condutividade hidráulica, a drenagem e aeração, além de concentrar no solo sódio trocável, carbonato e bicarbonato. Esse problema torna mais difícil o manejo porque altera as propriedades físicas, proporcionando a formação de camadas de impedimento que oferecem resistência para o movimento livre de ar e água e ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (CAVALCANTE, 2000).

Para Freire et al. (2003) a predominância de sódio em relação aos demais cátions, no complexo de troca, pode promover a dispersão dos colóides e a migração das

argilas para as camadas subsequentes do perfil de solo. Essas inconveniências causam a obstrução dos poros e redução da transmissividade do solo tão essencial ao crescimento das plantas (MORAIS et al., 1997).

Os solos halomórficos, formados pelos processos de salinização e/ou solonização e solodização, são usualmente classificados com base em dois critérios: (1) o conteúdo total de sais solúveis e (2) a percentagem de sódio trocável (RIBEIRO, 2010).

Em virtude da propriedade dos íons em solução conduzirem a corrente elétrica, a condutividade elétrica do extrato da pasta saturada, mais conhecida como condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), é o mais rápido e simples método para se estimar o total de sais solúveis do solo, tendo em vista que a condução da corrente elétrica é diretamente proporcional a quantidade de íons em solução (AYERS & WESTCOT, 1985).

A PST, que representa o percentual de Na^+ em relação à capacidade total de troca de cátions é calculada pela Equação 1:

$$PST = \left(\frac{\text{Sódio Trocável}}{CTC} \right) \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Três grupos de solos halomórficos são definidos em função destes parâmetros pelo USSL Staff (1954): solos salinos, solos salino-alcálicos e solos alcálicos; mais conhecidos, a partir de 1963, como solos salinos, salino-sódicos e sódicos.

a) Solos salinos: são considerados salinos, segundo o USSL Staff (1954), quando a CEes é maior ou igual a 4 dS m^{-1} e a PST é menor que 15%. Normalmente o pH destes solos é menor que 8,5. Solos com altos níveis de salinidade apresentam, na época seca, a superfície coberta por eflorescências salinas, que formam uma crosta esbranquiçada. Em virtude da alta concentração de sais solúveis na solução do solo e da ausência de quantidades expressivas de sódio no complexo de troca, os solos salinos são geralmente floculados, apresentando permeabilidade igual ou maior que a de solos similares não salinos (USSL Staff, 1954). Em virtude da floculação das argilas estes solos também não apresentam estrutura prismática ou colunar (QUEIROZ et al., 2005). Os solos salinos correspondem aos solos classificados como Solonchacks nos antigos sistemas de classificação taxonômica e no sistema atual do *World Reference Base for Soil*

Resources(WRB). No atual Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) a salinidade é considerada no caráter sálico ($CEes \geq 7 \text{ dSm}^{-1}$, a 25C) e no caráter salino ($4 \leq CEes < 7 \text{ dSm}^{-1}$, a 25C), utilizados para separar classes no segundo, terceiro e quarto níveis categóricos (EMBRAPA, 2006).

b) Solos salino-sódicos: os solos são classificados como salino-sódicos quando a PST atinge valores maiores ou iguais a 15% e os níveis de salinidade permanecem altos com CEes maior ou igual a 4 dSm^{-1} (USSL Staff, 1954). Devido ao excesso de sais, os solos salino-sódicos possuem geralmente, pH menor ou igual a 8,5 e parte dos colóides permanece ainda floculada. Mantidas as condições ambientais os solos permanecerão nestas condições(USSL Staff, 1954). Estes solos foram classificados como Solonchak-Solonetzico nos antigos sistemas de classificação taxonômica.

c) Solos sódicos: denominados de Solonetz nos antigos sistemas de classificação taxonômica, podem evoluir de um solo salino-sódico, através de um processo de drenagem natural ou artificial que promova a lixiviação dos sais, ficando o solo apenas com sódio no complexo de troca (EMBRAPA, 2006). Os solos sódicos caracterizam-se por apresentar PST maior ou igual a 15% e CEes menor que 4 dSm^{-1} , com um pH, geralmente, entre 8,5 e 10, resultante da hidrólise do Na^+ do complexo de troca ou da formação de Na_2CO_3 . O alto pH resultante dispersa a argila podendo dar cor escura ao solo (álcali negro) e fazendo com que a argila migre no perfil formando um horizonte Btn, com alto teor de sódio, estrutura colunar ou prismática e condições físicas altamente desfavoráveis a penetração da água e das raízes(USSL Staff, 1954).

3.3. Geoprocessamento aplicado aos estudos da salinidade

O geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas em conjunto com procedimentos computacionais que, operando sobre bases de dados georreferenciados existentes e originados do sensoriamento remoto, da cartografia digital ou de qualquer outra fonte, executa classificações e outras transformações dirigidas à elucidação da organização do espaço geográfico (SILVA, 2001).

Diversos autores têm reportado que a utilização de informações obtidas através de geoprocessamento pode prever atributos dos solos assim como mapeá-los de maneira menos onerosa e mais rápida do que as convencionais (BROWN et al., 2006). A integração de dados obtidos por sensoriamento remoto, sob a forma de imagens de satélite, em SIGs, impulsionou a capacidade de delineamento e mapeamento da salinidade do solo e o uso da técnica tem boas indicações de sua exatidão, relação custo/benefício, rapidez e economia (AL-MULLA, 2010).

Bui (1997) desenvolveu um modelo de avaliação do risco de salinização em áreas recém-desmatadas no nordeste da Austrália. O modelo foi desenvolvido em ambiente SIG sendo que para as variáveis selecionadas foram aplicados pesos diferentes de acordo com seu impacto na salinização do solo. Foram consideradas as seguintes variáveis: clima, cobertura vegetal, relevo, profundidade do lençol freático, taxa de recarga de águas subterrâneas e presença de sais no solo. Os resultados obtidos indicaram que devem ser evitados os desmatamentos em áreas de recarga de aquíferos não confinados, de forma a minimizar os riscos de salinização.

Evans & Caccetta (2000) apresentaram um método para prever áreas sob risco de salinização das terras secas usando informações derivadas de imagens multi-temporais do satélite Landsat combinadas com dados derivados de modelos numéricos do terreno. O método foi aplicado na região agrícola do sudoeste da Austrália para prever áreas em risco de salinidade. Os autores utilizaram árvores de decisão para determinar a relação entre o risco de salinidade e as variáveis que descrevem os aspectos da paisagem. Procedimentos de seleção de recursos foram usados para determinar o subconjunto ótimo de variáveis para prever áreas de risco. Estudos preliminares foram realizados em cinco sub bacias e o modelo extrapolado para produção de mapas de uma área de aproximadamente 30.000 km².

Utset et al. (2001) desenvolveram um modelo matemático baseado em SIG para avaliar os efeitos da irrigação na salinização do solo em condições de aquecimento global no Vale de Santo Antônio, sudoeste de Cuba. Foi utilizado o modelo SWAP (*Soil Water Atmosphere Plant*) para prever a elevação do lençol freático após a irrigação em condições de aumento da temperatura global. Resultados simulados indicaram aumento drástico do lençol freático devido à elevação da quantidade de água utilizada na irrigação e a expansão de 31,4 para 98,6 ha de áreas salinizadas em 15 anos.

Asmar (2001) desenvolveu um modelo baseado em SIG para identificação de áreas propensas a desertificação no Líbano. Foram desenvolvidos índices referentes ao

clima, tipo de solo, vegetação, pressão demográfica e intensidade de uso do solo. A integração dos diferentes índices foi feita utilizando-se diferentes mapas no ambiente SIG. Os resultados obtidos indicaram uma aproximação satisfatória em relação às áreas prioritárias de intervenção.

Abdelfattah et al. (2009), desenvolveram um modelo para o mapeamento da salinidade do solo, em uma região semiárida dos Emirados Árabes, usando Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas. O desenvolvimento do modelo consistiu na interação de imagens de satélite e observações locais. O SIG foi utilizado para integrar os dados e informações disponíveis, para o design do modelo, e para elaboração dos diferentes mapas. Os seus resultados indicaram 63% da área de estudo classificados como áreas de salinidade forte, enquanto que 37% foram classificados como áreas de salinidade leve a moderada. O estudo confirmou que os dados de sensoriamento remoto e técnicas de SIG são ferramentas poderosas na detecção de salinidade em diferentes intensidades. Os autores recomendaram a adoção do modelo para o estudo da salinidade em áreas similares.

Em seu estudo, Farifteh et al. (2006) afirmam que, apesar do Sensoriamento Remoto ser uma técnica amplamente utilizada para detectar e mapear áreas afetadas por sais, as aplicações têm-se centrado principalmente em áreas com salinidade severa e pouca atenção tem sido dada à detecção e monitoramento de áreas pouco ou moderadamente afetadas por sais. Os autores descrevem a estrutura conceitual de um método onde os dados obtidos a partir de sensoriamento remoto são integrados com os resultados de modelos de simulação e levantamento geofísico de modo a prever diferentes níveis (baixo, moderado, grave) de salinização/alcalinização de forma eficiente e com um custo atrativo. No método proposto integrado, os autores conseguiram combinar os dados, não só para demarcar os solos afetados, mas também para monitorar a salinização como um processo pedogenético presente.

No estudo intitulado “Sensoriamento remoto da salinidade do solo em áreas áridas na Arábia Saudita”, Hassoun (2010) utilizou uma série multitemporal de dados do satélite Landsat (TM) para monitorar os solos afetados pela salinidade em uma região árida. Os autores identificaram as classes espectrais e as áreas correspondentes aos diferentes usos da terra da região, delineou e mapeou as áreas afetadas por sais e avaliou as mudanças temporais da salinidade em termos de sua gravidade e extensão para o período investigado. Os resultados do estudo indicaram uma expansão do problema da salinidade e os autores concluíram que é urgente a atuação de programas de

gerenciamento e controle da salinidade na área, além da necessidade de recuperar áreas já degradadas que poderiam ser utilizadas para a agricultura.

3.4. Estatística multivariada

3.4.1. Considerações gerais

No monitoramento de recursos naturais geralmente adotam-se medidas de múltiplos parâmetros, as quais são efetuadas em diferentes épocas e originadas de diferentes áreas, gerando uma complexa matriz multivariada de difícil interpretação decorrente do grande número de informações interdependentes contidas na mesma.

Em oposição a este fato, segundo Andrade et al. (2010), o ser humano tende, intuitivamente, a analisar isoladamente as variáveis de um fenômeno qualquer e a partir desta análise fazer inferências sobre a realidade. Esta simplificação tem vantagens e desvantagens. Quando um fenômeno depende de muitas variáveis, geralmente este tipo de análise falha, pois não basta conhecer informações estatísticas isoladas, mas é necessário também conhecer a totalidade das informações fornecidas pelo conjunto de variáveis. Desta maneira as relações existentes entre as variáveis não são percebidas e assim efeitos antagônicos ou sinérgicos entre variáveis dificultam a interpretação do fenômeno (EVERITT, 1993).

Um caminho que pode ser adotado para se reduzir esta limitação é o emprego da estatística multivariada. A denominação “Análise Multivariada” corresponde a um grande número de métodos e técnicas que utilizam simultaneamente todas as variáveis na interpretação teórica do conjunto de dados obtidos, sendo, portanto, ferramentas estatísticas que apresentam uma visão mais global do fenômeno do que aquela possível numa abordagem univariada (MAROCO, 2003).

A análise multivariada se preocupa com métodos estatísticos para desenvolver e analisar dados de muitas variáveis simultaneamente. A necessidade de entender o relacionamento entre diversas variáveis faz da análise multivariada uma metodologia com grande potencial de aplicação, principalmente na época atual com a tecnologia informática cada vez mais veloz e acessível (JOHNSON & WICHERN, 1988).

Segundo Johnson & Wichern (1988), a análise multivariada pode ser usada para redução e simplificação dos dados, distribuição e agrupamentos, investigação da dependência entre variáveis, predição e teste de hipóteses.

Dentre os métodos estatísticos multivariados destacam-se a Análise de Agrupamento e a Análise Fatorial ou Análise das Componentes Principais.

3.4.2 Análise das componentes principais

A Análise das Componentes Principais (ACP) é considerada um dos métodos mais utilizados dentro da análise multivariada (PLA, 1986 apud JOHAN, 2001). Segundo Karlsson (1992) citado por Bressan et al. (2001), a ACP é uma técnica estatística que possibilita, em investigações com um grande número de dados disponíveis, a identificação das medidas responsáveis pelas maiores variações entre os resultados sem perdas significativas de informações.

As informações extraídas do grande número de dados disponíveis em uma pesquisa, através da ACP, são chamadas de componentes principais. A primeira componente principal explica o máximo possível da variância total contida nos dados em uma única dimensão. A segunda componente não é relacionada com a primeira, e explica o máximo da variância restante entre todas as componentes não correlacionadas com a primeira componente principal. Já a terceira componente não é relacionada com as duas primeiras e explica o máximo de variância restante entre todas as componentes relacionadas com as duas primeiras. As componentes seguintes estão sempre explicando o restante de correlação entre os elementos não correlacionados com as componentes principais anteriores. Esta relação segue até a perda total de correlação entre os segmentos (PALÁCIO, 2004).

É crescente a aplicação da Análise das Componentes Principais em estudos na área de ciências da terra.

Carneiro Neto (2005) realizou uma análise integrada dos usos dos recursos naturais de perímetros irrigados localizados na bacia do Acaraú, no Estado do Ceará, através do desenvolvimento de um índice de sustentabilidade agroecológico. O autor usou o método dos componentes principais como forma de agregação dos indicadores de estado da sustentabilidade para se chegar a um índice de sustentabilidade.

Valladares et al. (2008), em estudo de organossolos, aplicaram a análise dos componentes principais para agrupar os perfis com o auxílio de atributos morfológicos, físicos, químicos e do ambiente de ocorrência. A ACP mostrou-se adequada no agrupamento dos solos estudados com base em seus atributos, comparando-se com a sua taxonomia. Os autores concluíram que o método é promissor como ferramenta em estudos na Ciência do Solo.

Yang et al. (2009) investigaram a variabilidade espacial da salinidade do solo em três áreas no delta do Rio Amarelo, China, e buscaram possíveis explicações para sua distribuição utilizando análise das componentes principais e geoestatística. Os autores concluíram que as técnicas facilitaram a separação das diferentes fontes de variação espacial em diferentes escalas. De modo geral a salinidade do solo foi afetada por condições ambientais como clima, geologia e topografia, e por atividades humanas como a irrigação e drenagem e usos do solo.

4. ÁREA DE ESTUDO

4.1. Localização geográfica e caracterização geral

A área de estudo corresponde ao Estado do Ceará que está inteiramente inserido na região intertropical, próximo à linha do equador, entre os paralelos 2,5° e 8° de latitude Sul e os meridianos 37° e 42° de longitude Oeste, limitando-se a Norte com o Oceano Atlântico; ao Sul com o Estado de Pernambuco; a Leste com os Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba e a Oeste com o Estado do Piauí (IPECE, 2007).

O Estado tem área total de 148.826 km² (Resolução nº 5, de 10 de outubro de 2002, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), equivalente a 9,58% da área da região Nordeste e 1,75% da superfície do Brasil (CEARÁ, 2005). O mapa apresentado na Figura 5 mostra a posição do Ceará no contexto regional e nacional, bem como a sua divisão político-administrativa em 184 municípios.

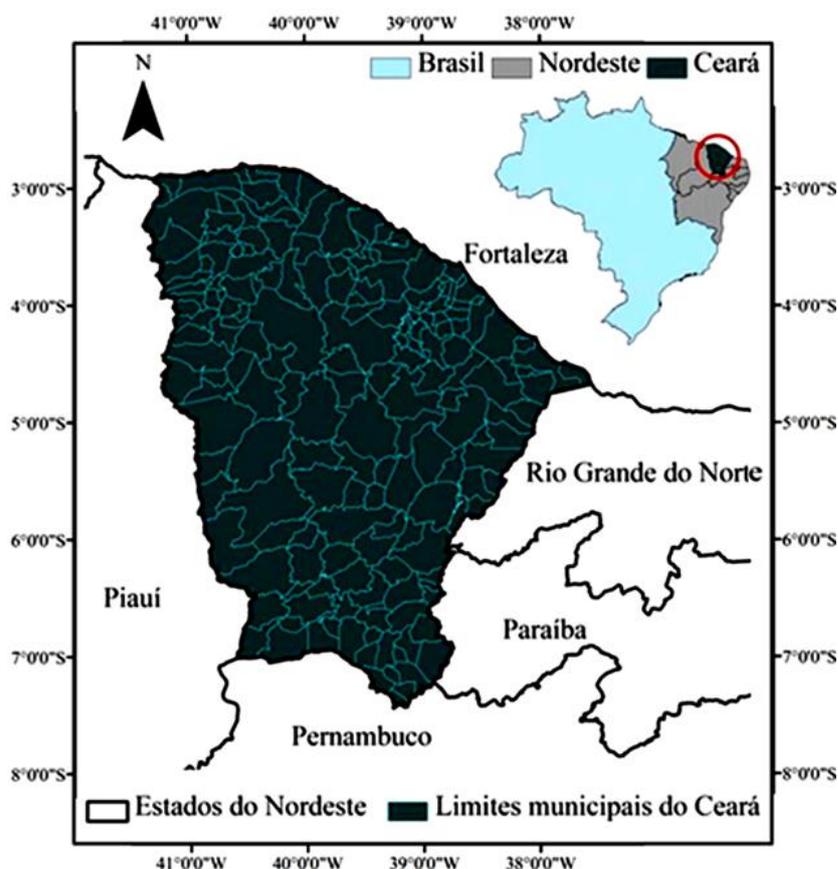


Figura 5 - Posição do Estado do Ceará no contexto regional e nacional e sua divisão político-administrativa em 184 municípios.

O Estado tem sua população estimada em 8.452.381 habitantes, sendo 23,9% moradores da zona rural (IBGE, 2010). Esta é caracterizada por minifúndios, sendo 72% de propriedades menores que 10 hectares e 22% de 10 a 100 hectares; assim, 94% são propriedades menores que 100 hectares (BRASIL, 2005).

4.2. Caracterização fisiográfica

4.2.1. Geologia e geomorfologia

A compartimentação topográfica do território cearense, com base em uma estrutura geológica complexa decorrente da consolidação de blocos desde o Pré-Cambriano e com falhamentos orientados em geral para o Nordeste, é constatada como do período Jurássico Superior (SOUZA et al., 1979).

Os fatores estruturais têm relação direta com as macroestruturas dos escudos do embasamento cristalino e de bacias sedimentares. Conforme citado na publicação do Atlas do Ceará de 1995, realizada pela Fundação Instituto de Planejamento do Ceará - IPLANCE, o domínio cristalino constitui cerca de 75% do território cearense, enquanto as formações sedimentares se fazem presentes em apenas algumas áreas do Estado: na faixa costeira, na região da Chapada do Apodi, na região do Cariri Cearense, e na região da Serra da Ibiapaba (CEARÁ, 2005).

O relevo cearense engloba compartimentos bastante diferenciados, que se justificam por mecanismos genéticos complexos. Há prevalência das superfícies rebaixadas do sertão recobertas por caatingas, que compreendendo extensas depressões periféricas de bordos de bacias sedimentares em contato com rochas do escudo cristalino, se estendem no sentido dos fundos dos vales ou se dirigem para o litoral através de declives suaves. Estas depressões, que atestam os efeitos pronunciados dos processos erosivos a que estiveram submetidas no Pleistoceno, são constantemente interrompidas pelo surgimento de formas residuais elevadas que constituem os relevos serranos. Nesse particular, há uma diversificação da paisagem dos sertões, pelo surgimento não apenas destas serras mas também pelas planícies aluviais (SOUZA et al.1979).

SOUZA et al. (1979) identificaram 9 unidades geoambientais no Estado do Ceará, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Unidades Geoambientais predominantes no Estado do Ceará

Unidades	Área (km ²)	Área (%)
Planície Litorânea	746	0,50
Tabuleiros Sub-Litorâneos	14.684	9,79
Depressão Sertaneja	101.992	68,91
Chapada do Apodi	2.346	1,45
Chapada do Araripe	2.786	1,75
Planalto da Ibiapaba	8.114	5,41
Maçãos Residuais Cristalinos	11.502	7,70
Cristas Residuais e Inselbergs	2.306	1,56
Planícies Fluviais	4.340	2,93
Total	148.826	100

FONTE: Souza et al. (1979)

4.2.2. Solos

No Estado do Ceará, a exemplo do que ocorre em grande parte do território brasileiro, existe uma grande diversidade de classes de solos, os quais se destacam como um reflexo direto dos fatores pedogenéticos. Romero e Ferreira (2010) ressaltam que as condições climáticas do Estado, marcadas pelos baixos índices de pluviosidade, elevadas temperaturas e altas taxas de evaporação, condicionam a ocorrência de determinadas classes de solos, tidas como as mais características do semiárido cearense.

Na Figura 6 é apresentado o mapa de solos digitalizado e georreferenciado a partir do produzido pelo Levantamento Exploratório – Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará (BRASIL, 1973). Este mapa, na escala 1:600.000, foi produzido por Leão (2010) que o resgatou da página do Arquivo Digital Europeu de Mapas de Solos (*European Digital Archive of Soil Maps – EuDASM*). Constata-se a preponderância de quatro principais classes de solos no Estado: ARGISSOLOS, LUVISSOLOS, PLANOSSOLOS e NEOSSOLOS.

Os Argissolos destacam-se como a segunda classe de solos em extensão no Ceará, abrangendo cerca de 24,67% da área total do Estado. Esta ordem envolve os antigos Podzólicos Bruno-Acinzentado, Podzólicos Vermelho-Amarelo Distrófico,

Podzólico Vermelho Escuro, Podzólico Amarelo e Terra Roxa Estruturada (Figura 6). Os Argissolos têm profundidades variadas e ampla variabilidade de classes texturais. Nesses solos, constata-se grande diversidade nas propriedades de interesse para a fertilidade e uso agrícola (teor variável de nutrientes, textura, profundidade, presença ou ausência de cascalhos, pedras, ocorrência em diferentes posições na paisagem, entre outras) (ROMERO & FERREIRA, 2010).

Os Luvisolos abrangem os antigos Bruno Não Cálcico, Podzólicos Vermelho Amarelo Eutrófico, Podzólicos Bruno Acinzentado e Podzólicos Vermelho-Escuros Eutróficos (Figura 6). No território cearense, cobrem grandes áreas estendendo-se pelas zonas do Sertão Central, Centro Norte e Sudoeste. São em sua maioria pouco profundos (menos de 90 cm de espessura), com ampla variabilidade de classes texturais; e apresentam como principais limitações ao uso agrícola o relevo ondulado e a rochiosidade (EMBRAPA, 2006).

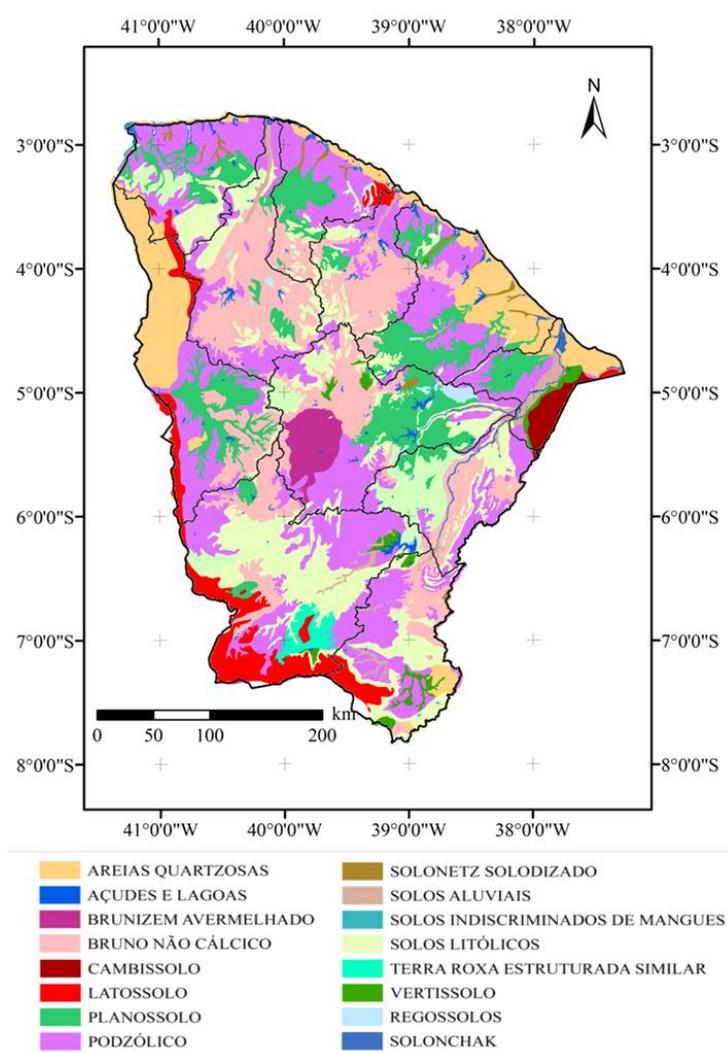


Figura 6 -Solos do Estado do Ceará digitalizado e adaptado a partir do mapa produzido por Jacomine et. al.(1973) (Fonte: Leão, 2010).

A classe dos Neossolos não existia antes da criação do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos, no ano de 1999. Neste, quatro das antigas classes de solos foram agrupadas para compor a ordem dos Neossolos; são elas: Solos Litólicos, Regossolos, Solos Aluviais e Areias Quartzosas (Figura 6). Os solos quartzarênicos, em geral, são solos originados de depósitos arenosos, apresentando textura de areia ou areia franca ao longo de até 2 m de profundidade, e são constituídos essencialmente de grãos de quartzo (ROMERO & FERREIRA, 2010).

Os Planossolos abrangem os antigos Solonetz-Solodizados e Hidromórficos e Planossolos (Figura 6). De um modo geral encontram-se associados às áreas de relevo plano a suave ondulado, em regiões de baixada e no terço inferior de encostas. Quanto à exploração agrícola sua principal limitação diz respeito às suas propriedades físicas: má drenagem e elevada susceptibilidade à erosão e aqueles que apresentam caráter sódico (Planossolos Nátricos) têm a limitação adicional de ordem química devido ao excesso de sódio.

4.3. Caracterização hidroclimatológica

4.3.1. Aspectos climáticos

Segundo a classificação de Köppen (1948), o Estado do Ceará tem dois principais tipos de clima: (1) o clima Aw' – Tropical chuvoso quente-úmido com chuvas de verão-outono que domina o litoral, a faixa setentrional, o leste e o sudeste; e (2) o clima Bsh - semi-árido quente, constatado no centro e sudoeste (ARAÚJO et al., 1998).

Sob predominância do clima semiárido, o Estado é vulnerável aos fenômenos da seca, caracterizada principalmente pela irregularidade têmporo-espacial e escassez pluviométrica em determinados períodos do ano e tem seus efeitos potencializados pelas altas taxas de evaporação (IPECE, 2010).

As temperaturas no Estado variam de mínimas de 17°C no topo das serras a máximas próximas a 40°C nos sertões mais quentes. Os dias mais frios ocorrem geralmente em junho e julho e os mais quentes, entre outubro e fevereiro. A temperatura

média alcança 29°C em algumas regiões, e a amplitude anual é de 5°C (ARAÚJO et al., 1998).

Em termos de precipitações pluviométricas, o Estado é caracterizado por dois períodos bem distintos ao longo do ano: um chuvoso, que se estende principalmente de fevereiro a maio, e um período seco compreendendo os meses de junho a outubro (LEÃO, 2010). Outro período intermediário, chamado de pré-estação chuvosa, pode começar em meados de novembro e estender-se até janeiro. Devido à variabilidade interanual e a irregularidade da distribuição, o período de chuvas pode extrapolar esse intervalo ou ser até menor. O valor médio anual da pluviosidade no Ceará varia de 553 mm até 1.671mm (LOPES et al., 2009), sendo que os valores extremos chegam a 250 mm anuais no sertão e a 2700 mm anuais no litoral (SANTOS et al., 2009). O principal sistema causador de chuva é a zona de convergência intertropical (ZCIT), seguido de sistemas secundários como linhas de instabilidade, complexos convectivos de mesoescala e efeitos de brisas. No segundo semestre a ocorrência de chuva é pequena, há um predomínio de altas pressões atmosféricas e uma quase total ausência de fenômenos atmosféricos causadores de chuva, por isso chama-se estação seca (SAMPAIO et al., 2005). Devido à atuação dos vários sistemas meteorológicos, com características e escalas diferentes, a estação chuvosa apresenta uma grande variabilidade na distribuição temporal (veranicos), espacial (áreas bem próximas com diferentes índices pluviométricos), e quantitativa da chuva. As condições termodinâmicas dos Oceanos Pacífico (El-Niño e La-Niña) e Atlântico (Dipolo), também influenciam fortemente a variabilidade interanual das chuvas na região, responsáveis pela existência de anos secos, normais e chuvosos (SANTANA et al., 2008).

4.3.2. Recursos hídricos

O Estado é composto por 11 regiões hidrográficas: Alto Jaguaribe, Salgado, Médio Jaguaribe, Banabuiú, Baixo Jaguaribe, Metropolitana, Curu, Acaraú, Coreaú, Poti (Parnaíba) e Litorânea (Aracatiáçu) (Figura 7) (COGERH, 2011).

O regime hidrológico dos cursos d'água no Ceará é condicionado, e principalmente afetado, dentre outros fatores, pela irregularidade das chuvas e pelas

condições geológicas das áreas onde se situam as diversas bacias hidrográficas (SANTANA et al., 2008). A principal característica hidrológica é o caráter intermitente de seus rios, propriedade diretamente relacionada ao regime pluvial na região e às condições edáficas. O escoamento nos riachos e em alguns rios desaparece no período de estiagem. Estes podem ser temporários, quando o fluxo de água superficial mais duradouro é interrompido por um período de seca estacional, ou efêmeros, quando o fluxo de água superficial ocorre apenas após uma precipitação (MALTCHICK, 1999).

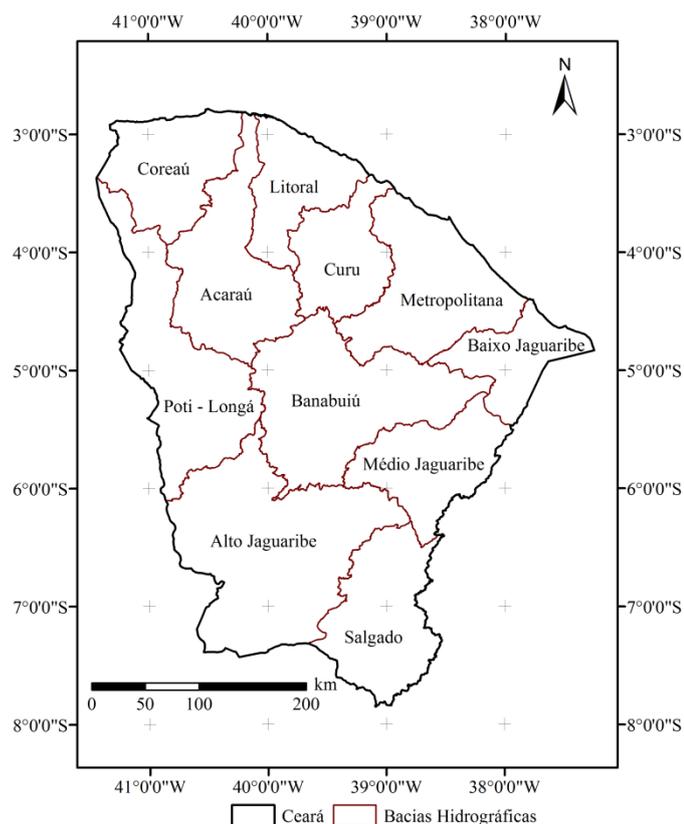


Figura 7 - Regiões Hidrográficas do Estado do Ceará (COGERH, 2011)

Apesar de todas as condições desfavoráveis, não apresentando um escoamento uniforme durante o ano, os deflúvios médios dos rios do Estado, somados, alcançam a ordem de 12 bilhões de metros cúbicos anualmente, correspondente a uma dotação específica de 2,57 L/s/km². Para que se ressalte a importância desse número, ele representa cerca de 13% de todo deflúvio da Região Hidrográfica Costeira do Nordeste Oriental (685.303 km²) que é de 93 bilhões de metros cúbicos por ano, representando 4,29 L/s/km² (SAMPAIO et al., 2005).

O Estado também é caracterizado pela existência de uma ampla infra-estrutura hídrica composta por açudes, canais e adutoras. Segundo a COGERH (2011), são cerca de 26.969 açudes com espelho d'água acima de 5 hectares.

5. MATERIAL E MÉTODOS

Para um melhor entendimento da metodologia adotada, elaborou-se um fluxograma contendo as etapas seguidas para o desenvolvimento do estudo (Figura 8). Cada etapa foi, então, descrita nos itens subsequentes.



Figura 8 – Esquema da metodologia de trabalho.

5.1. Elaboração dos mapas

Considerando-se que o processo de salinização é resultado da interação de diversos fatores, sejam eles físicos, ambientais ou devidos à ação antrópica; foram gerados, para a determinação do risco de salinização dos solos do Estado do Ceará, mapas referentes aos critérios geologia, relevo, pedologia, clima, qualidade da água, malha hídrica e uso dos solos.

Para elaboração dos mapas foi compilada uma base de dados contendo como planos de informação os elementos essenciais para sua composição tais como mapa de

geologia; mapa de solos; modelo numérico do terreno e imagens digitais obtidas por sensoriamento remoto; arquivos no formato *shapefile* e *raster* dos limites do Estado do Ceará, de suas bacias hidrográficas e municípios; e dados ambientais secundários, com referência geográfica, obtidos junto às principais instituições, grupos de pesquisa e/ou órgãos públicos de monitoramento, além de estudos publicados no formato de artigos e comunicados científicos, dissertações e teses acadêmicas.

Para o tratamento e processamento dos dados e confecção dos mapas, foram utilizados programas computacionais como Excel (Microsoft); ArcMap, versão 9.3 (ESRI); Envi, versão 4.3 (ITT VIS); GlobalMapper, versão 8.0 (Blue Marble) e Spring, versão 5.1.7 (INPE).

5.1.1. Geologia

Foi utilizado o mapa de geologia, com detalhamento das unidades litológicas, produzido pelo Projeto Radam Brasil e disponibilizado na forma digital pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2003). Os perfis litológicos do Estado do Ceará apresentam grande variabilidade, como é apresentado na Figura 9.

Os fatores estruturais têm relação direta com as macroestruturas em nível de escudos do embasamento cristalino e de bacias sedimentares. As rochas cristalinas ocupam uma área que corresponde a cerca de 85% da área do Estado. De acordo com Pompeu Sobrinho (1941), são rochas resistentes e bastante estáveis, compostas, sobretudo, de gnaisses, micaxistos e quartzitos, compreendendo também calcários e granatitos, com numerosas instruções de rochas ígneas, básicas. O gnaiss, que é a rocha mais importante e abundante do sistema, tem o caráter muito duro, pouco poroso, é profunda e profusamente cortado por veios de quartzo.

O cenário cronolitoestratigráfico do território cearense, incluindo seus componentes rochosos, pode ser dividido nos seguintes termos:

- Arqueano-Paleoproterozóico: são descritos o Complexo Cruzeta, no “Subdomínio Ceará Central” e Complexo Granjeiro, no Subdomínio homônimo. Os mesmos encerram como litotipos principais os ortognaisses cinzentos, gnaisses e xistos aluminosos, além de estreitas faixas de formações metavulcanossedimentares, por vezes incluindo corpos de metagabros e diferenciados metaioríticos.

- Proterozóico e Paleozóico: são descritos os complexos Granja, Ceará, Tamboril - Santa Quitéria, Acopiara, Jaguaratama, e outras unidades litoestratigráficas de menor abrangência. Essas formações encerramnaissesdiversos, de derivações sedimentar e magmática; biotita, migmatitos deestruturas variadas, além de quartzitos, rochas calcissilicáticas, calcários cristalinos, metassedimentos como micaxistos,metabasitos, metariolitos, metassiltitos,metarenitos, metagrauvas e metaconglomerados.

- Neoproterozóico e Paleozóico:Complexos/Suites Granitóides, compreendendo fácies subordinadas descritas comomicrogranitos, paragnaisses,micaxistos, rochas carbonáticas; Suites/Complexos Básico-Intermediáriosou Gabróides e ComplexoTauá,compostos essencialmente a partir de dioritos, gabros e granitoides; Grupo Jaibaras com arenitos diversos,folhelhos, siltitos e conglomerados; e Grupo Cococi com conglomerados,arenitos diversos, ardósias, folhelhos, argilitos.

- Paleozóico: Grupo Serra Grande e Formação Mauriti, constituídos de conglomerados e arenitos,em parte feldspáticos, com intercalaçõesde siltitos e folhelhos.

- Mesozóico: Grupo Vale do Cariri, Araripe e Apodi, onde estão presentes folhelhos e siltitos, arenitos diversos, calcários, gipsita, conglomerados.

- Cenozóico: Grupo Barreiras, que inclui umdomínio indiviso (conglomerados argilosos) de ampladistribuição na faixa litorânea; Formação Camocim(conglomerados cimentados por materiallaterítico sílico-ferruginosos, extremamenteduro e compacto), no noroeste doEstado, e Faceira (conglomerados, arenitospouco litificados, siltitos com níveisde argilas e cascalhos, e lateritos nabase), na região do Baixo Jaguaribe.

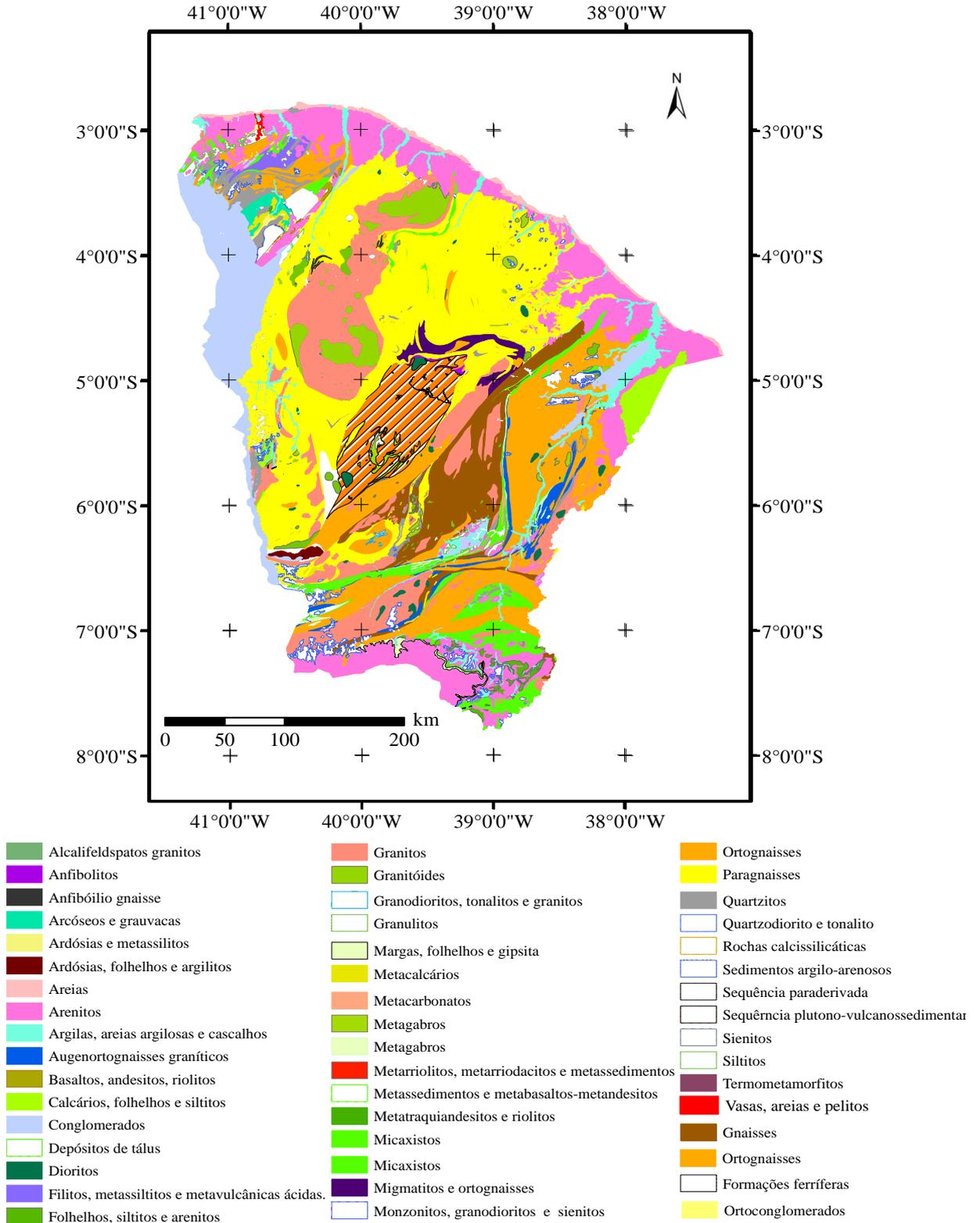


Figura 9 - Litologia do Estado do Ceará (Adaptado de CPRM, 2003)

5.1.2 Relevô

O mapa de relevô foi gerado a partir do Modelo Numérico do Terreno (MNT) proveniente dos dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 92 metros. Os dados da SRTM foram obtidos na rede mundial de computadores diretamente do endereço eletrônico “www2.jpl.nasa.gov/srtm/”. O propósito da missão SRTM foi atuar na produção de um banco de dados digitais para todo o planeta, necessários na elaboração de Modelo Numérico do Terreno (MNT) ou Modelo Digital de Elevação (MDE). Sob responsabilidade da *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA) e da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), a SRTM coletou dados de radar no período de 11 a 22 de fevereiro de 2000, a bordo da nave espacial *Endeavour*. Nesse período, a nave realizou 176 órbitas na Terra e obteve dados de elevação de aproximadamente 80% da superfície terrestre (NASA, 2009).

Os arquivos disponibilizados pela NASA foram abertos diretamente no software Global Mapper onde tiveram suas coordenadas configuradas (UTM SAD 69) e foram exportados no formato “ASCII Grid” com resolução de 92 metros. No software ArcMap; o arquivo exportado no formato “ASCII” foi convertido em *raster*. Em seguida, utilizando ferramentas de análise espacial (funções “álgebra de mapas” e “*slope*”), obteve-se o Modelo Digital de Elevação do Estado do Ceará e, a partir dele, a classificação do relevô considerando a declividade em valores percentuais.

Conforme a metodologia descrita pela Embrapa (2006) foram, então, atribuídas as seguintes classes na descrição do relevô:

- Plano: superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos. Declividades menores que 3%.
- Suave ondulado: superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e, ou, outeiros (elevações de altitudes relativas da ordem de 50 a 100 m, respectivamente), apresentando declives suaves, de 3 a 8%.
- Ondulado: superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e ou, outeiros, apresentando declives acentuados, entre 8 e 20%.

- Forte ondulado: superfície de topografia movimentada, formada por outeiros, e/ou morros (elevações de 100 a 200 m de altitude relativa) com declives fortes, entre 20 e 45%.
- Montanhoso: superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas e maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes, de 45 a 75%.
- Escarpado: regiões ou áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo escarpamentos, como: aparado, itaimbé, frente de cuevas, falésia, flanco de serras alcantiladas, vertente de declive muito forte de vales encaixados. Declives maiores que 75%.

5.1.3 Pedologia

Para elaboração do mapa de Pedologia, utilizou-se como material base o mapa de solos do Estado do Ceará (BRASIL, 1972), a descrição dos perfis contida no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará (JACOMINE *et al.*, 1973) e a nova versão do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006).

No ambiente SIG, os tipos de solos foram classificados em função das classes de drenagem apresentadas na caracterização realizada por Jacomine *et al.* (1973). Para tanto, manipulou-se a “Tabela de Atributos” do *layer* solos relacionando para cada tipo de solo a classe de drenagem correspondente e assim obteve-se o mapa de drenagem dos solos do Estado do Ceará.

A caracterização dos solos quanto à drenagem, realizada por Jacomine *et al.* (1973), os diferencia em 8 classes qualitativas a saber: solos excessivamente drenados, fortemente drenados, acentuadamente drenados, bem drenados, moderadamente drenados, imperfeitamente drenados, mal drenados e finalmente, solos muito mal drenados.

Na Tabela 2 são apresentados os solos presentes no Estado do Ceará, no 1º nível categórico, que diferencia as classes de solos em grupos bastante heterogêneos, com suas respectivas classes de drenagem, de acordo com Jacomine *et al.* (1973).

Tabela 2 - Tipos de solos do Estado do Ceará e suas respectivas classes de drenagem de acordo com Jacomine *et al.* (1973).

Tipo de Solo	Classe de drenagem
Areias Quartzosas	Excessivamente drenados
Brunizem Avermelhado	Moderadamente drenados
Bruno Não Cálculo	Bem drenados
Cambissolo	Bem drenados
Latossolos	Fortemente drenados
Planossolos solódicos	Mal drenados
Podzólicos	Acentuadamente drenados
Solonetz Solodizado	Imperfeitamente drenados
Solos Aluviais	Imperfeitamente drenados
Solos Indiscriminados de Mangues	Muito mal drenados
Solos Litólicos	Moderadamente drenados
Terra Roxa Estruturada Similar	Bem drenados
Vertissolos	Imperfeitamente drenados
Regossolos	Excessivamente drenados
Solonchak	Mal drenado

(FONTE: Jacomine *et al.* 1973)

Por conta da adoção do novo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2006), o mapa pedológico do Estado foi editado, no SIG ArcMap, visando uma aproximação da atualização da classificação taxonômica dos perfis. Os perfis descritos no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará foram reclassificados conforme EMBRAPA (2006), F.R.B.Leite *et al.* (2007) e F.A.B.Leite *et al.* (2007).

5.1.4 Clima

Para a elaboração do mapa temático Clima foi considerada a classificação climática de Thornthwaite (1948).

Ao contrário da classificação climática de Köppen, de 1931, que se baseia no pressuposto de que a vegetação natural de cada grande região da Terra é essencialmente uma expressão do clima nela prevalente e, assim, considera a vegetação como um dos indicadores da classe climática da região; a classificação climática de Thornthwaite (1948) se baseia em outros índices como o de umidade, o de aridez, o hídrico e o de eficiência térmica, e tem como o fator mais importante a evapotranspiração potencial e a sua comparação com a precipitação típica de uma determinada área (FABRES, 2009).

Assim, adotou-se o Índice de Aridez de Thornthwaite para descrever as características climáticas da área de estudo.

5.1.4.1 Precipitação atmosférica

O mapa de Precipitação do Estado do Ceará foi gerado a partir da espacialização, com o uso de geoestatística, de um conjunto de valores de precipitação média anual. Na Figura 10 é apresentado o fluxograma no qual as etapas metodológicas são discriminadas.



Figura 10 - Sequência metodológica para elaboração do mapa de Precipitação.

Para o cálculo da precipitação média anual foram utilizados valores de precipitação diários de 148 postos pluviométricos distribuídos por todo o Estado do Ceará (Figura 11). Os dados pluviométricos foram provenientes da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). O número de postos pluviométricos selecionados foi determinado em função das séries históricas de modo que todas contivessem um período, no mínimo, superior a 30 anos de registros, abrangendo os anos entre 1976 e 2010.

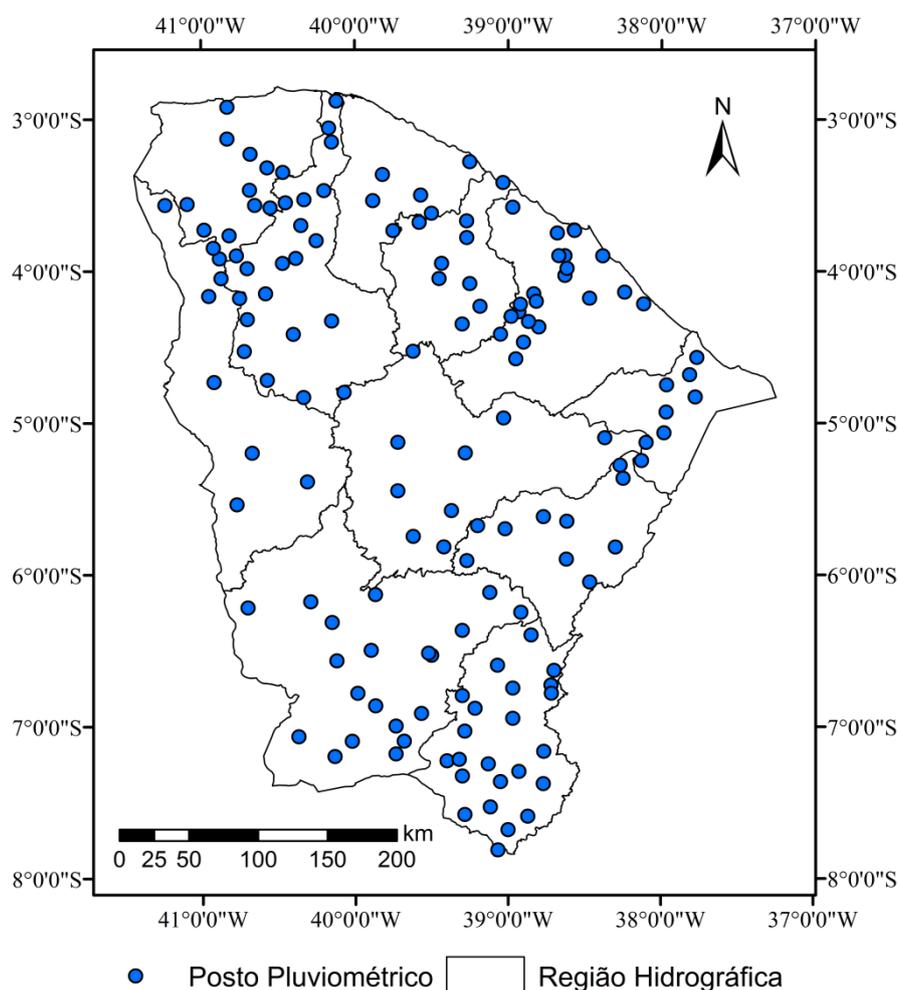


Figura 11 - Localização dos Postos Pluviométricos no Estado do Ceará.

A despeito de que vários trabalhos têm sido desenvolvidos com a utilização de métodos de interpolação espacial para estimativas de parâmetros geograficamente distribuídos; poucos têm se atentado para a necessidade de definir o melhor método de interpolação para cada circunstância, o que é realizado através da avaliação do desempenho dos interpoladores (LENNON & TUNNER, 1995). Diante do fato, para a

especialização dos dados de precipitação do Estado do Ceará, foi primeiramente avaliado o desempenho do método geostatístico de Krig, comumente adotado na espacialização de precipitação pluviométrica, como por exemplo, por Atkinson e Lloyd (2002), Kastelec e Košmelj (2002), Mello et al. (2003), Reis et al. (2005) e Lélis e Barroso (2011).

Desse modo, para a espacialização do fator Precipitação, a base de dados digital consistiu nos arquivos vetoriais do limite do Estado do Ceará e da localização de cada posto pluviométrico com seus respectivos valores de precipitação média anual.

Os valores amostrais de precipitação foram submetidos a uma análise estatística descritiva a fim de se verificar alguma anormalidade dos mesmos, realizando-se, em seguida, a análise geostatística visando quantificar o grau de dependência espacial dos dados, através de semivariograma experimental.

O ajuste do semivariograma teórico foi realizado para os modelos exponencial, esférico e gaussiano. Em seguida, realizou-se a validação cruzada dos dados obtidos por todos os modelos, através da metodologia apresentada por Davis (1987), na qual uma amostra é descartada sucessivamente na realização da interpolação e assim, é possível obter o valor estimado (E) relativo a amostra retirada e, posteriormente, compará-lo como valor real observado da variável (O). Para o processamento e análise de dados foram utilizados os softwares ArcMap e Spring.

Através dos índices estatísticos fornecidos pela validação cruzada dos dados foi possível realizar a avaliação do desempenho dos interpoladores e seleção do modelo utilizando-se como critério de decisão o menor valor do erro médio quadrático (RMSE), conforme Legates & McCabe Jr. (1999) definido pela Equação 2.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^J (O_i - E_i)^2}{J}} \text{ (Eq. 2)}$$

em que:

O_i – i -ésimo valor real observado (amostra);

E_i – i -ésimo valor estimado pelo método (interpolado);

J – número de observações;

EQM – erro quadrático médio.

5.1.4.2. Evapotranspiração

O mapa da Evapotranspiração Potencial do Estado do Ceará foi gerado a partir da espacialização, com o uso de geoestatística, de um conjunto de valores calculados de evapotranspiração média anual. A metodologia adotada, semelhante à aplicada para a elaboração do mapa de Precipitação, é apresentada na Figura 12.

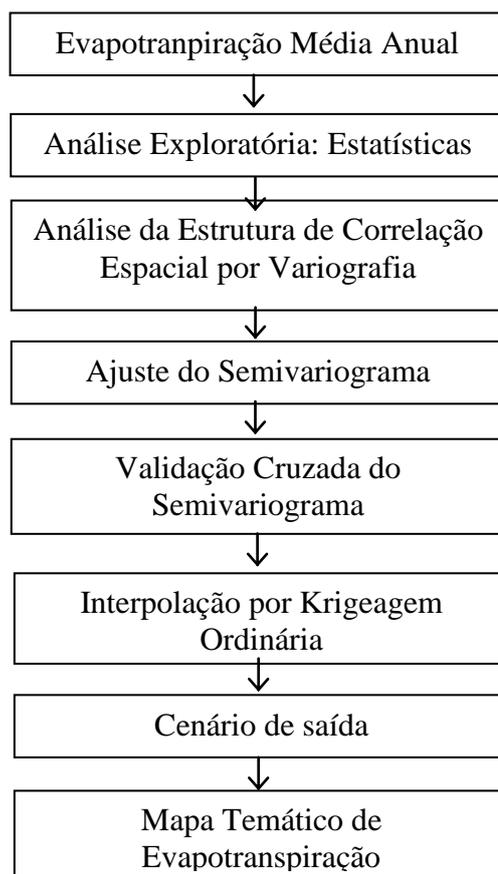


Figura 12 - Sequência metodológica para elaboração do mapa de Evapotranspiração.

Para a estimativa da evapotranspiração potencial foi utilizado o método de Penman-Montheith recomendado pela FAO (Equação 3) (ALLEN et al., 1998). Foram compilados dados das principais variáveis climáticas relacionadas com a evapotranspiração em 16 municípios do Estado (Figura 13) que dispunham de dados climáticos médios completos: temperaturas máximas e mínimas, umidade relativa, velocidade do vento a 2 metros da superfície do solo, altitude e coordenadas geográficas. Para conseguir uma cobertura adequada do território do Estado, não foi possível utilizar dados provenientes de estações meteorológicas de uma única

instituição, e por isso foram utilizadas estações (Figura 13) de diferentes fontes como a Estação Meteorológica do Campus do Pici, na Universidade Federal do Ceará (UFC); o Centro Nacional de Pesquisa de Agroindústria Tropical, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA); as Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); e o Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará.

$$ET_o = \frac{0,480\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0,34u_2)} \quad (\text{Eq. 3})$$

Em que:

ET_o - evapotranspiração obtida pelo método de Penman-Monteith (mmdia^{-1});

R_n - saldo de radiação ($\text{MJm}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

G - fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$);

Δ - inclinação da curva de saturação do vapor de água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

u_2 - velocidade do vento a 2 metros acima da superfície do solo (m s^{-1});

T - temperatura média do ar a 2 metros acima da superfície do solo ($^\circ\text{C}$);

e_s - a pressão de vapor do ar saturado (kPa);

e_a - pressão atual do vapor (kPa);

γ - constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$),

Para a espacialização do fator Evapotranspiração, a base de dados digital consistiu nos arquivos vetoriais do limite do Estado do Ceará, da localização das estações meteorológicas e seus respectivos valores de evapotranspiração média anual. As etapas seguidas para análise geostatística são as mesmas descritas para a precipitação pluviométrica, no tópico 5.1.4.1.

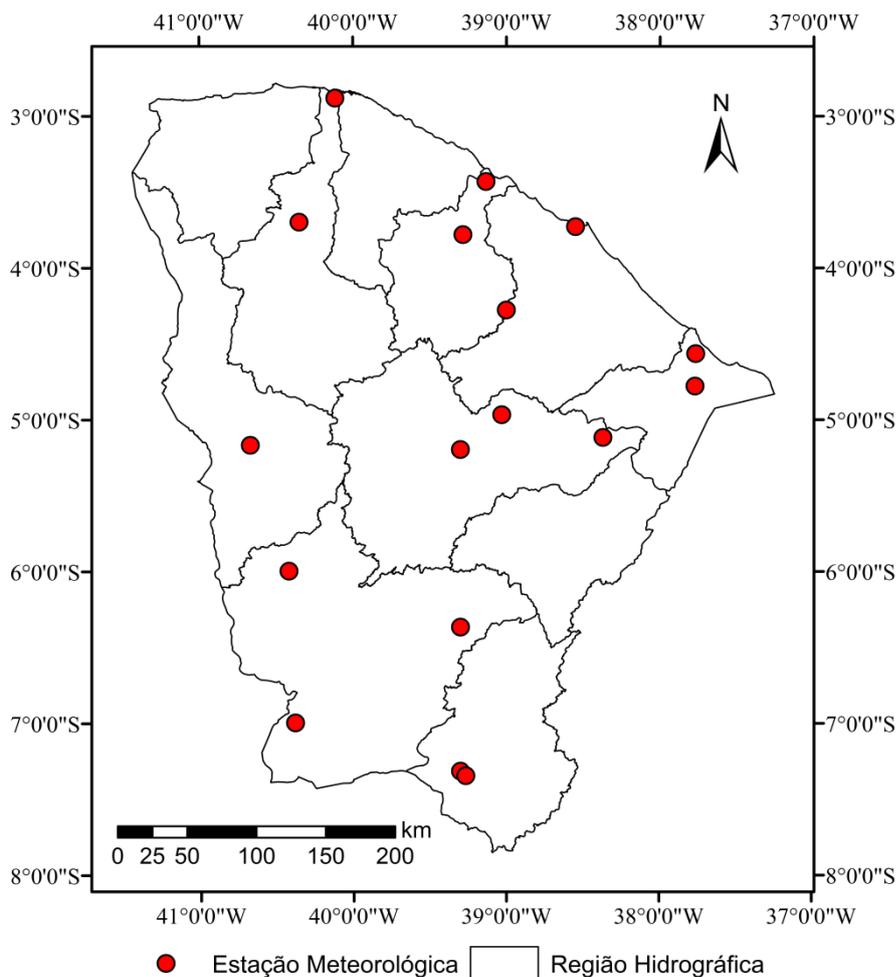


Figura 13 -Localização das estações meteorológicas no Estado do Ceará

Assim como para o parâmetro Precipitação Pluviométrica, a análise geoestatística foi realizada no software Spring, em seguida, os cenários de saída foram processados no software ArcMap, onde foram agrupados em classes e foi recortada apenas os limites da área de estudo.

5.1.4.3 Índice de aridez

Existem várias metodologias utilizadas para a determinação da aridez de uma região. Neste estudo seguiu-se o critério estabelecido pela Organização das Nações Unidas (UNESCO, 1979), baseado na metodologia desenvolvida por Thornthwaite, em 1948 com posterior ajuste por Penman, em 1953, segundo o qual o índice de aridez (IA) de uma região consiste na razão entre a quantidade de água advinda da chuva

(Precipitação) e as potenciais perdas de água para a atmosfera (Evapotranspiração Potencial).

Assim, foi compilada uma base de dados contendo como planos de informação valores de precipitação, de evapotranspiração potencial e as coordenadas geográficas das estações climatológicas. Os dados de precipitação e evapotranspiração foram especializados e, no software ArcMap, utilizou-se a ferramenta “álgebra de mapas” para a aplicação da equação de Thornthwaite, conforme descrição de Zomer *et al.* . (2008) (Equação 4).

$$IA = \frac{PPt}{ETo} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

IA – Índice de Aridez

PPt – precipitação média anual (mm/ano)

ETo – evapotranspiração potencial média anual (mm/ano)

Em seguida, utilizando a ferramenta de análise espacial função “*reclassify*” no ArcMap, atribuíram-se as classes climáticas para o índice de aridez, conforme critérios estabelecidos por Thornthwaite, em 1948, ajustado por Penman, em 1953, apresentados na tabela 4.

Tabela 3 -Classes de clima de acordo com o índice de aridez proposto por Thornthwaite

Classe	Índice de aridez
Hiper-árido	<0,03
Árido	0,03 – 0,20
Semiárido	0,21 – 0,50
Sub-úmido seco	0,51 – 0,65
Sub-úmido e úmido	>0,65

(FONTE: Resolução CONAMA N° 238)

5.1.5. Malha hídrica

A malha hídrica do Estado do Ceará foi dividida em dois segmentos: o primeiro, referente aos rios principais e o segundo compreendendo os seus principais afluentes. Esses trechos foram selecionados de acordo com os Cadernos Regionais de cada bacia hidrográfica, publicações do Instituto de Estudo e Pesquisas para o Desenvolvimento do Estado do Ceará (INESP, 2009), que os classifica como de caráter perene ou como principais afluentes, ao contrário do demais, de menor porte, que são de caráter intermitente e/ou efêmeros, ou seja, possuem água durante o período das chuvas (ou das cheias), e desaparecem durante o período de estiagem (período das secas).

Para a delimitação da malha hídrica utilizaram-se dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente dos dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução espacial de 92 metros.

No software ArcGIS 9.3 foi gerado um MDE com coordenadas X, Y e Z, sendo X e Y as coordenadas Leste e Norte da projeção UTM, *Datum* SAD69, Zona 24 S, enquanto Z é a altitude representativa do pixel ou da área por ele representada. O MDE foi então submetido às ferramentas do modelo *ArcHydro* desenvolvidas pelo Centro de Pesquisa em Recursos Hídricos (*Center for Research in Water Resources - CRWR*) da *University of Texas at Austin*, implementado no ambiente ArcGIS. O algoritmo permite a obtenção de um modelo digital de elevação hidrograficamente consistido, bem como o delineamento automático de bacias hidrográficas e dos seus cursos de água (LEÃO, 2010).

O número mínimo de píxeis definido como contribuinte das células do fluxo (*threshold*), para que uma determinada célula fosse identificada como integrante de um curso de água, foi 500. Este valor mostrou-se o mais adequado por ser capaz de delinear com precisão os segmentos de interesse; além de que valores numéricos menores do *threshold* foram responsáveis pelo aumento exponencial do tempo de processamento do algoritmo.

Os dados gerados na sequência do algoritmo formaram segmentos de curso de água que recebem um mesmo valor e são apresentados em formato matricial. Em seguida, os dados foram convertidos para o tipo vetorial, no qual os píxeis que constituem os rios são transformados em polilinhas.

Para averiguar a coerência dos dados obtidos, a hidrografia gerada automaticamente foi visualmente comparada, através de sobreposições no SIG, com imagens de satélite fornecidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Figura 17) e cartas topográficas da SUDENE. A ponderação pela comparação com

outras fontes de hidrografia também foi realizada por Colombo et al. (2007) e Leão (2010).

Para definição das zonas de risco à salinização ao longo dos rios, foi utilizada a ferramenta de análise espacial função “*buffer*”, sendo que para os rios principais as referidas zonas foram definidas com distâncias de 150, 300, 450 e 600 m a partir do centro dos rios principais; e para os afluentes, as distâncias foram de 100, 200, 300 e 400 m. Tais zonas foram definidas tendo-se como base os estudos realizados por Saccon, et al. (2003) e Harum et al. (2004).

5.1.6. Qualidade da água

A qualidade da água foi determinada pela metodologia proposta por Richards (1954). Essa metodologia de classificação da água é mais utilizada em todo o mundo, e é recomendada pelo Laboratório de Salinidade dos EUA (USDA), que se baseia na condutividade elétrica (CE) como indicadora do risco de desalinização e na Razão de Adsorção de Sódio (RAS) como indicadora de risco de desodificação do solo.

Os dados utilizados para elaboração do mapa de qualidade de água são provenientes do monitoramento das águas superficiais de reservatórios do Estado do Ceará, realizado pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH). No total, foram utilizados valores médios de CE de 132 reservatórios distribuídos por todo o território cearense, conforme apresentado na Figura 14.

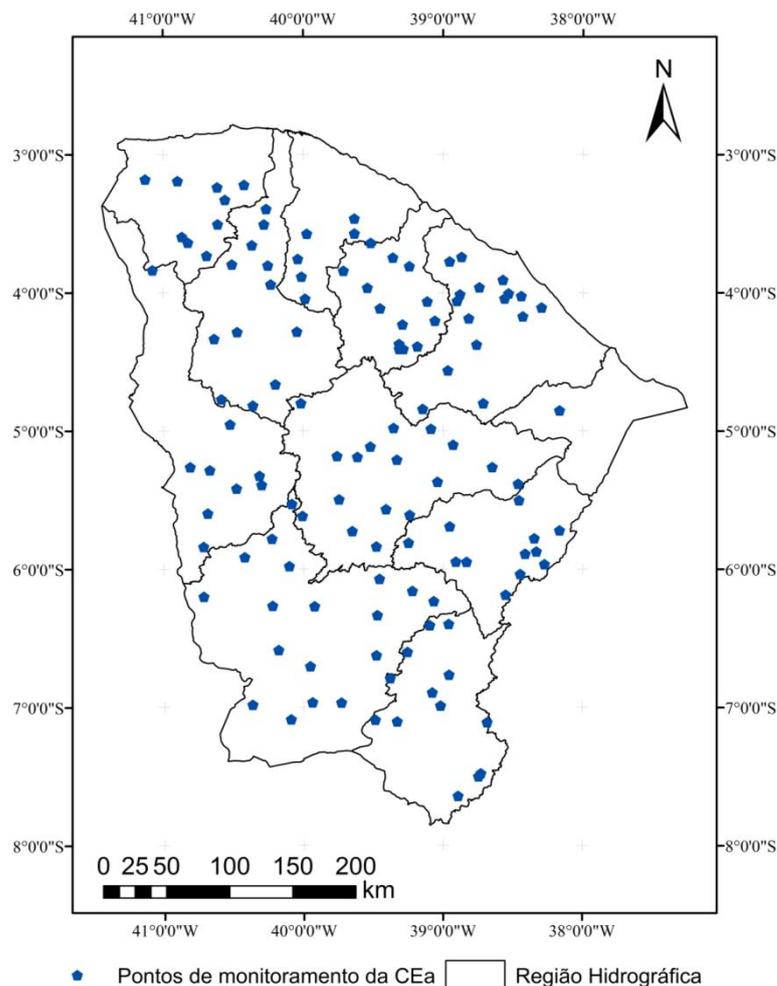


Figura 14—Localização dos pontos de coleta de água, realizada pela COGERH, no Estado do Ceará

Para a espacialização dos valores pontuais de CE foi utilizada a geoestatística e seguiram-se as mesmas etapas adotadas para os parâmetros Precipitação Pluviométrica e Evapotranspiração Potencial, descritas nos itens 5.1.4.1 e 5.1.4.2, respectivamente.

No software ArcMap utilizou-se a ferramenta “álgebra de mapas” para a classificação da qualidade da água quanto à concentração de sais solúveis conforme Richards (1954).

5.1.7. Uso e ocupação do solo

A elaboração do mapa de Uso e ocupação do solo foi realizada com base na classificação de imagens de satélite e, para tanto, seguiu-se as etapas discriminadas no fluxograma apresentado na Figura 15.

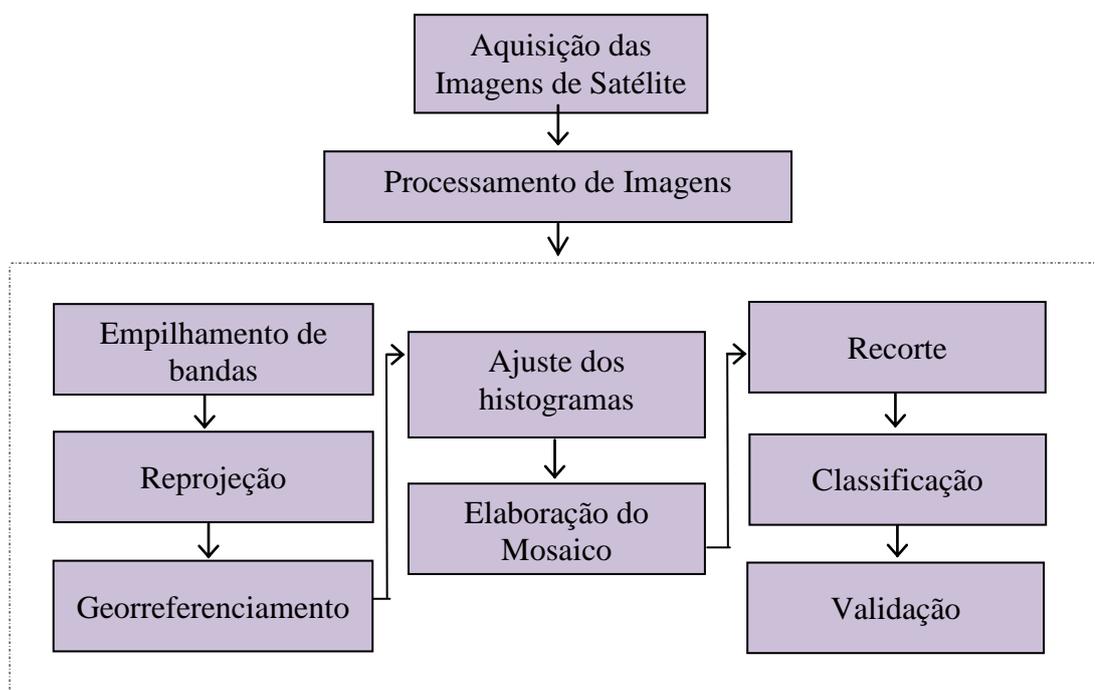


Figura 15 -Esquema metodológico para elaboração do mapa de uso e ocupação do solo do Ceará.

Todas as imagens foram adquiridas gratuitamente junto ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através da internet no endereço eletrônico “<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>” (INPE, 2011). Para abrangência do Estado Ceará, foram adquiridas 11 cenas do sensor TM (satélite LandSat 5), com resolução espacial de 30 metros, todas datadas do segundo semestre do ano, o que corresponde ao período seco na região Nordeste. Devido à dificuldade para obtenção de imagens com total ausência de nuvens, não foi possível obter cenas datadas de um mesmo ano então se adotou como critério a aquisição das cenas mais recentes e com a menor incidência de nuvens disponível. Na tabela 5 são apresentadas algumas especificações das imagens utilizadas.

As imagens foram pré-processadas no *software* Erdas Imagine (InteGraph): como o sensor TM possui sete bandas espectrais (entre 0,45 a 2,35 μm), realizou-se o

empilhamento das mesmas e, em seguida, cada imagem foi reprojeta para a projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) e *datum* SAD 69 (*South American Datum* 1969). A reprojeção foi necessária porque as imagens disponibilizadas pelo INPE encontravam-se na projeção UTM e *datum* WGS84 (*World Geodetic System* 1984) enquanto que neste estudo, apesar da projeção adotada ser a mesma (UTM), o *datum* utilizado foi o SAD69.

Tabela 4 - Especificações das cenas obtidas pelo satélite LandSat TM5 utilizadas para determinação do uso e ocupação do solo do Ceará

Órbita	Ponto	Data de passagem
216	63	06/08/2011
216	64	06/08/2011
216	65	01/09/2011
217	62	18/08/2007
217	63	03/09/2007
217	64	29/08/2011
217	65	29/08/2011
218	62	06/08/2006
218	63	03/07/2011
218	64	03/07/2001
218	65	01/08/2010
219	62	05/08/2010

As imagens tiveram seu georreferenciamento ajustado no *software* ENVI e para este processo foram considerados pontos com coordenadas geográficas conhecidas e de fácil identificação na imagem como cruzamentos de rodovias e paredes de açudes (Figura 16). As coordenadas geográficas dos pontos utilizados no georreferenciamento foram obtidas junto à plataforma do programa Google Earth (Keyhole Inc.2001) e nas cartas topográficas elaboradas pela SUDENE, identificando-se os pontos correspondentes entre as imagens e as cartas. As imagens foram georreferenciadas na projeção UTM, *Datum* SAD69, Zona 24 Sul, com tamanho de pixel de 30 x 30 m.

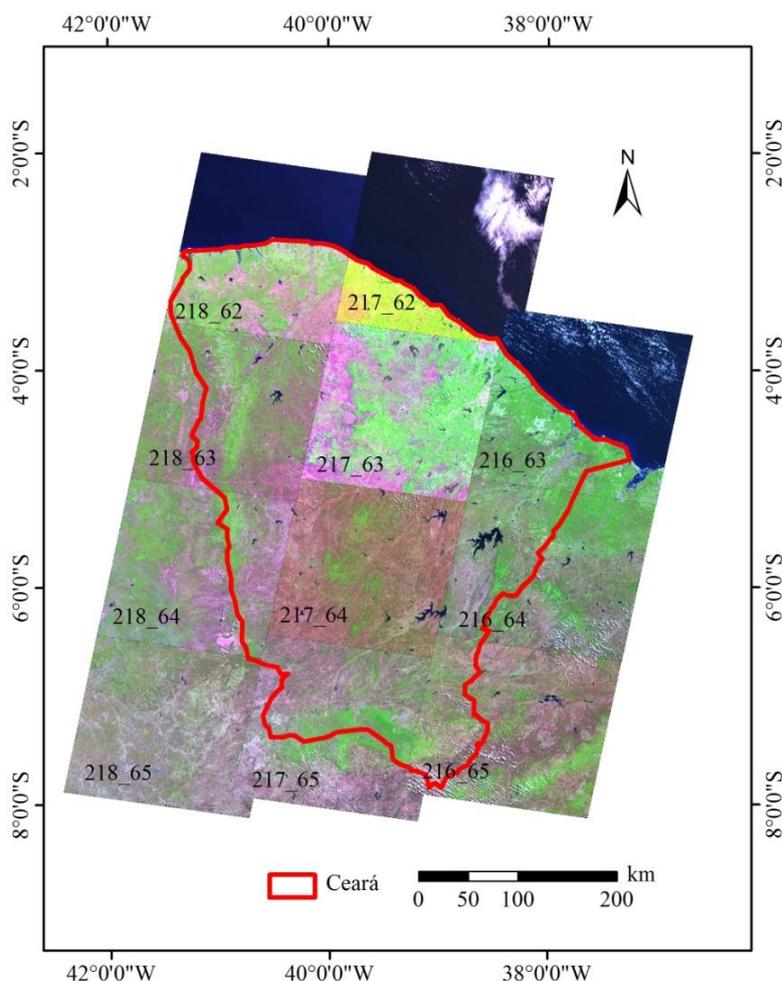


Figura 16 - Imagens digitais com georreferenciamento ajustado.

Como para a abrangência do Estado do Ceará foram adquiridas 11 imagens digitais, foi necessária a composição de um mosaico para a união das cenas em um único arquivo *raster*. O mosaico foi montado imagem a imagem e, antes da adição de cada imagem, por análise visual, escolheu-se aquela cujos elementos conhecidos apresentavam coloração mais adequada. Esta imagem foi então adotada como referência para o ajuste do histograma das outras imagens, procedimento este que garante a uniformidade e facilita a classificação. Esta etapa foi realizada no *software* Erdas Imagine onde também procedeu-se o recorte do mosaico obtendo apenas a área interna aos limites do Estado do Ceará(Figura 17).

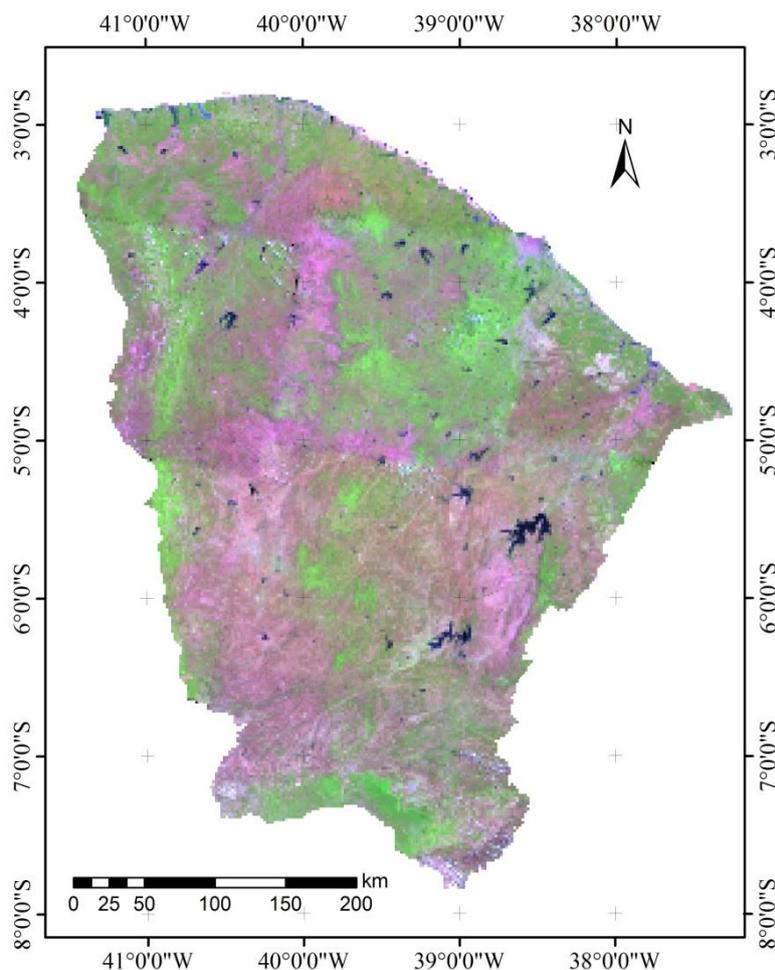


Figura 17 - Mosaico de imagens Landsat 5 compondo o território do Estado do Ceará

O mosaico georreferenciado das imagens Landsat 5 compondo a área de estudo foi submetido, no *software* ENVI, ao método Isodata de classificação não supervisionada de imagens. O algoritmo Isodata (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm*) utiliza a distância euclidiana no espaço de valores espectrais dos elementos da imagem para distribuí-los no grupo a que se assemelham, após certo número de interações. Foram definidos os parâmetros número mínimo de 5 e máximo de 30 classes, e 3 iterações. Após o processamento da classificação pelo algoritmo, as classes geradas foram agrupadas em cinco classes de cobertura do solo, a saber:

- 1 - Classe água: abrange rios, açudes, lagoas, e demais corpos hídricos;
- 2 - Classe Vegetação Densa: engloba a vegetação nativa densa, de porte mais elevado e/ou com características mais exuberantes;

3 – Classe Vegetação Rala: engloba a vegetação nativa arbustiva (porte baixo a médio) geralmente esparsa;

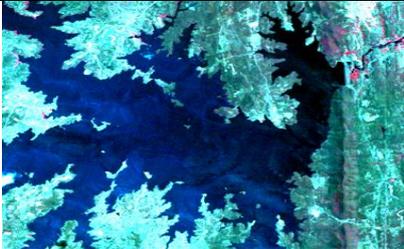
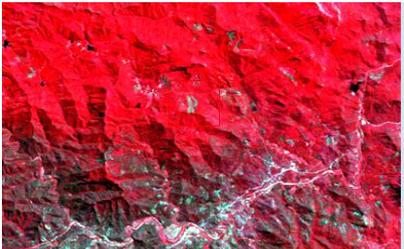
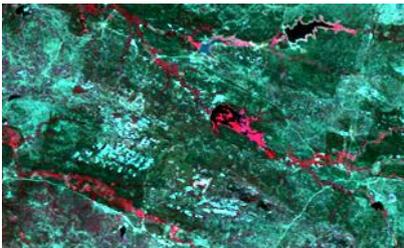
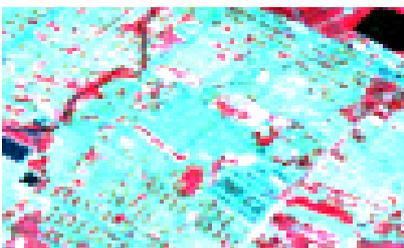
4 – Classe Solo Descoberto: abrange as áreas onde não há cobertura vegetal e o solo encontra-se parcial ou completamente exposto, sejam por razões naturais ou antrópicas. São exemplos: áreas completamente desmatadas, estradas, etc.;

5 – Classe Antropizada: são áreas com evidente submissão às ações antrópicas. Engloba os aglomerados urbanos, áreas agrícolas e áreas para uso da pecuária, bem caracterizadas nas imagens por polígonos de lados bem definidos;

6 – Classe Agricultura Irrigada: esta classe envolve as áreas agrícolas dos perímetros irrigados implantados pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS: Tucunduba, na Bacia do Coreaú; Jaburu e Realejo, na Bacia do Parnaíba; Jaibaras, Forquilha e Baixo Acaraú, na Bacia do Acaraú; Curu Recuperação e Curu-Paraipaba, na Bacia do Curu; Califórnia, Senador Pompeu, Banabuiú e Morada Nova, na Bacia do Banabuiú; Santo Antônio de Russas, na Bacia do Baixo Jaguaribe; Jaguaruana e Ema, na Bacia do Médio Jaguaribe; Chapada do Apodi, nas Bacia do Baixo e Médio Jaguaribe; e Lima Campos e Quixabinha, na Bacia do Salgado.

As classes escolhidas para o agrupamento apresentam-se na imagem com padrões de cores característicos. A classe Agricultura foi determinada com a vetorização das áreas dos perímetros irrigados implantados pelo DNOCS, de acordo com suas coordenadas geográficas e identificação visual nas imagens. Na Tabela 6 são apresentadas as informações de cor e o padrão com que cada classe se apresenta nas imagens quando utilizada a composição de bandas RGB (*Red, Green, Blue*) para cor verdadeira e falsa cor.

Tabela 5 - Classes de interesse nas cenas do satélite LANDSAT-5 em diferentes combinações de bandas no espaço RGB

Classe	Descrição da cor na composição 432	Padrão na Imagem (Composição R4G3B2 – falsa cor)	Padrão na Imagem (Composição R3G2B1 – cor verdadeira)
Água	Coloração preta ao azul escuro.		
Vegetação densa	Coloração vermelho intenso e brilhante.		
Vegetação rala	Coloração verdeclaro a escuro.		
Solo exposto	Coloração esbranquiçada, tons de amarelo, azul e verde claro.		
Área antropizada (área urbana)	Coloração branca e/ou azul claro.		
Agricultura Irrigada	Coloração magenta e vermelho opaco.		

Como mapeamentos dos usos das terras apoiados em sensoriamento remoto necessitam ser realizados com exatidão para que possam ser utilizados com segurança, é necessário avaliar a sua confiabilidade através de parâmetros que possibilitem a quantificação da exatidão do levantamento de uso das terras. Um dos parâmetros mais utilizados e eficientes na determinação da exatidão é o índice Kappa, que é obtido mediante a adoção de uma referência para a comparação dos mapeamentos produzidos (MANGABEIRA, 2003). A análise da exatidão dos mapeamentos é obtida através das matrizes de confusão ou matrizes de erro, sendo posteriormente calculado o índice Kappa de concordância (CONGALTON et al., 1993).

A matriz de erro ou matriz de confusão é uma matriz quadrada de números que expressam a quantidade de unidades amostrais associada a uma dada categoria durante o processo de classificação efetuado e à categoria real a que pertencem essas unidades (MANGABEIRA, 2003; CONGALTON, 1991).

Assim, a avaliação da classificação foi realizada por meio do coeficiente de Kappa (Equação 5), e sua qualidade determinada de acordo com os valores apresentados na Tabela 6. A matriz de confusão gerada para determinação deste índice foi obtida pela comparação entre os elementos classificados e os observados em imagens bem definidas na plataforma do programa computacional Google Earth, para tanto foi construída uma grade com 200 pontos georreferenciados que serviram como controle.

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^Y x_{ii} - \sum_{i=1}^Y (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^Y (x_{i+} * x_{+i})} \text{ (Eq. 5)}$$

Em que:

K - coeficiente Kappa de concordância;

N - número de observações (pontos amostrais);

r - número de linhas da matriz de erro;

x_{ii} -observações na linha i e coluna i , respectivamente;

x_{i+} - total marginal da linha i ;

x_{+i} -total marginal da coluna i .

Tabela 6 -Qualidade da classificação associada aos valores da estatística de Kappa

Valor de Kappa	Qualidade do mapa temático
<0,00	Péssima
0,00 – 0,20	Ruim
0,20 – 0,40	Razoável
0,40 – 0,60	Boa
0,60 – 0,80	Muito Boa
0,80 – 1,00	Excelente

FONTE: adaptada de Landis e Koch (1977)

5.2. Categorização do risco

Neste trabalho foi adotado um método índice de análise relativa, que dá resultados qualitativos. Os dados de cada mapa temático foram uniformizados e analisados segundo uma escala de quatro termos, associados aos números (ou notas): 1 (baixo), 2 (moderado), 3 (alto) e 4 (severo) (Tabela7). Esta metodologia também foi adotada por Valladares e Faria (2004), Figueirêdo (2005) e Mota (2011) para a análise de risco de salinização de solos.

Tabela 7 -Notas de risco de salinização e suas respectivas classificações.

Grau de Risco	Termo Correspondente
1	Baixo
2	Moderado
3	Alto
4	Severo

5.3. Classificação dos mapas quanto ao risco

Para a determinação do risco de salinização dos solos foram atribuídas notas de risco de salinização a cada uma das unidades de mapeamento dos temas (geologia, relevo, pedologia, clima, malha hídrica, qualidade da água e uso e ocupação do solo), sendo, então, obtidos os mapas de risco de salinização referente a cada variável.

As notas de risco de salinização obedeceram a critérios específicos, e foram atribuídas conforme a literatura e a opinião e experiência de especialistas. Os resultados

quantitativos foram transformados em classes qualitativas. Este método também foi empregado nos trabalhos de Crepani et al. (1996); Valladares et al. (2002); Bandeira (2003); Valladares & Faria (2004), Mota e Valladares (2011) e Mota (2011).

5.3.1. Geologia

A classificação do mapa de Geologia quanto ao risco de salinização foi realizada com base na composição litológica e suas respectivas susceptibilidades ao intemperismo. A atribuição de notas de risco foi realizada por especialista em Ciências dos Solos e também baseada na literatura, sobretudo nos estudos de Valladares e Farias (2004), Mota e Valladares (2011) e Mota (2011), que atribuíram escores de acordo com o risco potencial de cada tipo litológico de liberar de saise a permeabilidade permitida por essas litologias, de acordo com seu grau de metamorfismo.

As classes de litologia e as respectivas notas de risco de salinização são apresentadas na Tabela 8. O metamorfismo presente no Ceará apresenta-se em diferentes graus de intensidade que influencia as condições de fluxoe permeabilidade. No entanto, é importante ressaltar que autores como Cruz & Melo (1974), observaram que é possível que não ocorra nenhuma variação química que indique como principal influência a litologia na salinização. Os referidos autores observaram que águas procedentes das mais variadas litologias (gnaiesses, granitos de variada composição, xistos, quartzitos etc.) mostraram a mesma homogeneidade nos seus caracteres químicos.

Tabela 8 - Classes litológicas e suas respectivas notas de risco de salinização

LITOLOGIA	Nota de risco
Alcalifeldspatos granitos	1
Anfibolitos	1
Anfibólio gnaisse	1
Arcóseos e grauvacas	1
Ardósias e metassilitos	1
Ardósias, folhelhos e argilitos	1
Areias	1
Arenitos	1
Argilas, areias argilosas e cascalhos	3
Basaltos, andesitos, riolitos	4
Calcários, folhelhos e siltitos	3
Conglomerados	1
Dioritos	4
Filitos, metassilitos e metavulcânicas ácidas.	4
Folhelhos, siltitos e arenitos	4
Formações ferríferas	2
Gnaisses	2
Granitóides	2
Granodioritos, tonalitos e granitos	2
Granulitos	2
Margas, folhelhos e gipsita	2
Metacalcários	2
Metacarbonatos	2
Metagabros	2
Metarriolitos	2
Metassedimentos e metabasaltos-metandesitos	2
Metatraquiandesitos e riolitos	2
Micaxistos	3
Migmatitos e ortognaisses	3
Monzonitos, granodioritose sienitos	3
Ortoconglomerados	3
Ortognaisses	2
Paragnaisses	2
Quartzitos	2
Quartzodiorito e tonalito	2
Rochas calcissilicáticas	2
Sedimentos argilo-arenosos	3
Sequência paraderivada	1
Sequência plutono-vulcanossedimentar	1
Sienitos	1
Siltitos	1
Termometamorfitos	1
Vasas, areias e pelitos	1

5.3.2. Relevo

Utilizou-se o critério de que quanto maior a declividade, menor o risco do solo ao processo de salinização uma vez que a possibilidade de ocorrência de períodos de encharcamentos e/ou submersões, que condicionam uma situação propícia ao acúmulo de sais quando da ocorrência de evaporação da água, é menor em terrenos com declives mais acentuados em relação aos terrenos com relevo plano. O mesmo critério foi adotado por Evans e Caccetta (2000), Florinsky et al. (2003), Figueirêdo (2005), Madyaka (2008) e Mota (2011).

Assim, o mapa de relevo foi classificado quanto ao risco de salinização da seguinte forma: risco baixo, para áreas de declividade superior a 20%; risco moderado, para áreas de declividade entre 8 e 20%; risco alto para áreas de declividade entre 3 e 8%; e risco severo de salinização de solos para as áreas de declividade inferior a 3%. As classes de declividade e as respectivas notas de risco de salinização são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Classes declividade e notas de risco de salinização do solo.

Classes de Declividade	Classificação do Risco	Notas de Risco de Salinização
0 a 3%	Severo	4
3 a 8%	Alto	3
8 a 20%	Moderado	2
>20%	Baixo	1

5.3.3. Pedologia

Para cada tipo de solo foi relacionada a classe de drenagem correspondente, de acordo com Jacomine et al. (1973), e em seguida foram atribuídas as notas risco segundo o critério de que uma melhor drenagem significa maior capacidade de infiltração e, conseqüentemente, menor risco de salinização. Os tipos de solos, suas classes de drenagem e respectivas notas de risco de salinização são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10– Tipos de solos do Estado do Ceará, suas classes de drenagem e notas de risco de salinização.

Tipo de Solo	Classe de	Notas de Risco de Salinização
Areias Quartzosas	Excessivamente	1
Brunizem Avermelhado	Moderadamente	2
Bruno Não Cálculo	Bem drenados	1,5
Cambissolo	Bem drenados	1,5
Latossolos	Fortemente	1
Planossolos solódicos	Mal drenados	3,5
Podzólicos	Acentuadamente	1
Solonetz Solodizado	Imperfeitamente	3
Solos Aluviais	Imperfeitamente	3
Solos Indiscriminados de Mangues	Muito mal	4
Solos Litólicos	Moderadamente	2
Terra Roxa Estruturada Similar	Bem drenados	1,5
Vertissolos	Imperfeitamente	3
Regossolos	Excessivamente	1
Solonchak	Mal drenado	3,5

5.3.4. Clima

As notas de risco de salinização foram baseadas no índice de aridez da bacia, sendo que quanto maior o índice de aridez maior a nota de risco de salinização: em geral, quanto mais elevadas são as temperaturas, maior a evapotranspiração potencial e maior a redução da umidade na superfície do solo. Com o decréscimo da umidade na superfície do solo a tendência é que ocorra ascensão por capilaridade da água contendo sais existentes no próprio terreno e a acumulação dos mesmos em camadas superficiais (RIBEIRO, 2010). O mesmo critério foi adotado por Figueirêdo (2005).

Desta forma, o mapa do Clima do Estado do Ceará foi classificado quanto ao risco de salinização da seguinte forma: risco baixo, para áreas de clima Subúmido e úmido; risco moderado, para áreas de clima Subúmido seco; risco alto para áreas de Semiárido; e risco severo de salinização de solos para as áreas Áridas e Hiperáridas. As classes climáticas e as respectivas notas de risco de salinização são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11– Índice de Aridez e risco de salinização do solo

Classe	IA	Classificação do Risco	Nota Risco
Hiper árido	< 0,03	severo	4
Árido	0,03 – 0,20	severo	4
Semiárido	0,21 – 0,50	alto	3
Subúmido seco	0,51 – 0,65	moderado	2
Subúmido e úmido	> 0,65	baixo	1

5.3.5. Malha hídrica

Para classificação das áreas de risco referente ao tema Malha Hídrica, foram atribuídos maiores riscos de salinização a menores distâncias do centro dos rios (Tabela 12). O mesmo critério foi adotado Saccon, et al. (2003), Harum et al. (2004) e Figueirêdo (2005).

Assim, o mapa da malha hídrica do Estado do Ceará foi classificado quanto ao risco de salinização da seguinte forma: risco baixo para áreas distantes de 600 m dos rios principais e 400 m dos rios secundários; risco moderado para áreas distantes de 450 m dos rios principais e 300 m dos rios secundários; risco alto para áreas a 300 m dos rios principais e 200 m dos rios secundários; e finalmente, risco severo para terras situadas a 150 m do centro de rios principais e a 100m dos rios secundários.

Tabela 12– Segmentos da rede de drenagem, distâncias do centro do rio e suas respectivas notas de risco de salinização de solo.

Rios	Distância do centro do rio (m)	Classificação do Risco	Notas de Risco de Salinização
Principais	450 a 600	Baixo	1
	300 a 450	Moderado	2
	150 a 300	Alto	3
	0 a 150	Severo	4
Secundários	300 a 400	Baixo	1
	200 a 300	Moderado	2
	100 a 200	Alto	3
	0 a 100	Severo	4

5.3 6. Qualidade da água

Para a determinação do risco de salinização de solos referente ao tema Qualidade de Água, seguiu-se a metodologia recomendada pelo Laboratório de Salinidade dos EUA (*U.S. Salinity Laboratory Staff*– USDA, 1954), segundo a qual, o risco de salinização do solo pode ser baixo, médio, alto e muitoalto de acordo com a condutividade elétrica (Tabela 13).

Tabela 13– Classes de água e risco de salinização conforme Richards (1954) e respectivas notas de risco de salinização.

Classe de Água	CE (dS/m)	Richards (1954)	Nota de risco de
C1	0 – 0,25	“perigo baixo”	1
C2	0,25 – 0,75	“perigo médio”	2
C3	0,75 – 2,25	“perigo alto”	3
C4	2,25 – 5,0	“perigo muito alto”	4

5.3.7 Uso e ocupação do solo

Na tabela 14 são apresentados os riscos atribuídos para cada classe de uso do solo. Para a classe água foi atribuída a nota de risco 1, representativa do risco baixo. Para a classe Vegetação Densa, atribuiu-se nota 1, classificando-a como risco baixo por admitir que em áreas onde a vegetação nativa é bem preservada, o solo também encontrar-se-á nesta condição.

Tabela 14– Classes de Uso e Ocupação do Solo e suas respectivas notas de risco de salinização de solo

Uso e Ocupação do Solo	Classificação do Risco	Notas de Risco de Salinização
Água	Baixo	1
Vegetação densa	Baixo	1
Vegetação rala	Moderado	2
Área antropizada	Alto	3
Agricultura	Severo	4
Solo descoberto	Severo	4

À classe Vegetação Rala foi atribuída nota 2, indicando risco moderado: por englobar a vegetação nativa arbustiva, geralmente esparsa. Essa classe confere pouca cobertura ao solo, deixando-o muitas vezes bastante exposto.

A Classe Antropizada foi classificada como de alto risco e, portanto, recebeu nota de risco de salinização 3 uma vez que, além dos aglomerados urbanos, nesta classe também estão inclusas áreas agrícolas dispersas, áreas agrícolas em pousio e áreas para uso da pecuária ou áreas de pastagens nativas.

Já as áreas classificadas como Solo Descoberto receberam a nota de risco máxima, 4, indicando risco severo. A classe abrange as áreas onde não há cobertura vegetal e o solo encontra-se parcial ou completamente exposto.

A classe Agricultura representa as áreas de projetos de irrigação em atividade: por se tratar de áreas onde é praticada a agricultura irrigada, o risco de salinização foi considerado severo e, portanto, a classe recebeu nota 4. A irrigação, por mais baixa que seja o teor salino da água, independentemente do manejo, adiciona sais ao solo. Esse fato justifica os sérios problemas de áreas irrigadas, no Brasil e no resto do mundo, com água de muito boa qualidade. Nesse sentido, caso o solo seja potencial fértil do ponto de vista químico, a água solubilizará os componentes da fertilidade resultando em maior teor salino na solução dos solos, na dispersão das suas argilas principalmente pelo sódio e, com efeito, exercem estresse de natureza química pela salinidade e física pelo potencial osmótico às plantas e perdas da capacidade de infiltração e de drenagem.

5.4. Risco de salinização

O mapa de Risco de Salinização foi elaborado com a aplicação de três metodologias, descritas nos tópicos subsequentes: Média Aritmética Simples, Modelo definido por Especialistas e Modelo definido pela Análise da Componente Principal.

5.4.1. Média aritmética simples

A média aritmética dos foi obtida segundo a equação empírica (Equação 6):

$$A_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m N_{kij}}{m} \quad (\text{Eq.6})$$

Onde:

A_{ij} - valor do risco em cada célula da matriz final, sendo i as linhas e j as colunas;

m – número de parâmetros considerados;

k - indicador do parâmetro considerado, $k=(1,m)$;

N_k – valor do k -ésimo parâmetro de cada célula do mapa de risco considerado

Assim, A_{ij} correspondeu ao valor final de cada célula na matriz do mapa final de Risco de Salinização dos Solos; o valor de m foi 7, considerando os parâmetros geologia, relevo, pedologia, clima, qualidade de água, malha hídrica e uso do solo; e N foi o valor de cada célula dos mapas de risco de cada parâmetros considerado.

5.4.2. Modelo definido por especialistas

O método multicritério ordinal aditivo, definido por Silva, em 2001, como média ponderada foi aplicado segundo a equação 7. Segundo Jankowski (1995), o método é aplicável em processos de decisão apoiada em multicritérios e, portanto, adequado ao objetivo da elaboração do mapa de Risco de Salinização de Solos. A mesma metodologia foi adotada por Valladares e Faria (2004).

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^m (P_{kij} * N_{kij}) (\text{Eq. 7})$$

Onde:

A_{ij} – valor do risco em cada célula da matriz final;

k – indicador do parâmetro considerado, $k=(1,m)$;

P – peso atribuído a cada parâmetro;

N_k – valor do k -ésimo parâmetro de cada célula do mapa de risco considerado

Os pesos atribuídos a cada parâmetro foram determinados segundo o conhecimento e experiência de especialistas em salinidade de solos: uma pesquisa de opinião foi feita entre os pesquisadores do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade –INCTSal, de modo que os mesmos impusessem pesos para cada tema considerado no estudo. O Formulário respondido pelos especialistas é apresentado no Apêndice A. O resultado da opinião de oito especialistas foi: peso 20% para o critério Clima; 20% para Pedologia; 17% para a Qualidade da Água, representada pela condutividade elétrica; 15% para o tema Uso e Ocupação do Solo; 12% para o Relevo; 9% para Geologia e 7% para Malha Hídrica.

5.4.3. Emprego da Análise da Componente Principal

5.4.3.1. Conformação dos dados iniciais

As matrizes de dados interdependentes foram construídas com as tabelas de atributos de cada mapa temático.

Um exemplo de mapa temático considerado é o mapa do índice de aridez. Para este tema, considerou-se que quanto menor o índice de aridez, maior a nota de risco de salinização. A tabulação desse exemplo foi realizada conforme descrito no item 5.3, aplicando escores para cada classe: quando o índice de aridez variou de 0,21 a 0,5, recebeu o escore 3, quando variou de 0,51 a 0,65, escore 2.

5.4.3.2. Análise de consistência dos dados

Para a análise dos dados foi utilizado o SPSS 16.0 (*Statistical Package for the Social Sciences*), por apresentar bastante versatilidade no manuseio das operações necessárias à obtenção de componentes principais.

A primeira análise realizada foi de interdependência entre as variáveis, para verificar a adequabilidade do conjunto de variáveis ao procedimento estatístico. Foi realizada observando-se o comportamento dos elementos da matriz de correlação ou de variâncias-covariâncias fora da diagonal principal. Caso esses elementos apresentem reduzida amplitude, as variáveis são ditas não relacionadas e não é necessário proceder à

análise do fator, conforme observaram Johnson & Wichern (1978). Numa situação intermediária, onde apenas algumas variáveis específicas se apresentam pouco relacionadas com as demais, estas devem ser eliminadas do vetor de dados, pois sendo pouco relacionadas com as demais variáveis, tenderão a apresentar baixa proporção da variância explicada pelos fatores (HAIR JÚNIOR et al., 2005).

A consistência dos dados foi aferida pelo método *Kaiser Mayer Olkin* (KMO). Para esse método compara-se a magnitude dos coeficientes de correlação observados com os coeficientes de correlação parcial, produzindo o índice KMO (MONTEIRO & PINHEIRO, 2004), obtido pela seguinte equação 8:

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que:

r_{ij} - coeficiente de correlação simples entre a variável i e j;

a_{ij} - coeficiente de correlação parcial entre a variável i e j.

Meyer & Braga (1999) propuseram o seguinte critério de avaliação: o KMO é considerado ótimo quando maior ou igual a 0,90 e inaceitável quando inferior a 0,50. Em caso do índice não ser satisfatório, deve-se identificar a variável ou variáveis que não se apresentam ajustadas ao grupo e eliminá-las, repetindo esse processo até obter um índice KMO considerado satisfatório.

Silveira & Andrade (2002) propuseram intervalos como critério de qualificação para o resultado do KMO (Tabela 15).

Tabela 15 – Intervalo de validade do teste KMO, para aplicação no modelo de análise fatorial

Intervalo	Qualificação
KMO < 0,50	Inaceitável
0,50 < KMO < 0,70	Admissível
0,70 < KMO < 0,90	Adequado
KMO > 0,90	Excelente

Fonte: adaptado de Silveira & Andrade (2002)

5.4.3.3. Elaboração da matriz de cargas fatoriais

Segundo Verdinelli (1980) a extração dos fatores é obtida de acordo com a amplitude da variância da combinação linear das variáveis observadas. O primeiro fator extraído foi a combinação linear com variância máxima existente na amostra; o segundo, a combinação linear com a máxima variância remanescente; e assim sucessivamente.

A correlação de cada variável com os fatores é expressa, em termos algébricos, por:

$$X_i = A_{i1} \cdot F_1 + A_{i2} \cdot F_2 \dots A_{il} \cdot F_l + \xi \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que:

$(X_1, X_2 \dots X_n)$ - são expressos como a combinação linear dos fatores (F) ;

A- é expresso por meio das cargas fatoriais;

ξ - termo residual representa a parte não explicada pelos fatores.

Os fatores são deduzidos das variáveis observadas, no entanto, espera-se que um único subconjunto de variáveis caracterize o índice do Risco de Salinidade, possivelmente os de maiores coeficientes. Os fatores são obtidos através da combinação linear das variáveis normalizadas observadas como:

$$F_l = \sum_{i=1}^m W_{li} X_i = W_{l1} X_1 + W_{lm} X_m \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que:

W – coeficiente de contagem de cada fator;

X_i – score atribuído a cada variável,

M – número de variáveis.

O número de fatores extraídos foi definido pelo critério das raízes características (*eigenvalues*), onde se consideram somente componentes com autovalor superior a um, ou seja, que o fator deve explicar uma variância superior àquela apresentada por uma simples variável (HAIR JÚNIOR et al., 2005).

5.4.3.5. Elaboração do índice de risco de salinização

Algebricamente, a construção do índice de risco de salinização (IRS) é a combinação dos indicadores:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^m (P_{kij} * I_{kij}) \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde:

A_{ij} – valor do risco em cada célula da matriz final;

k – indicador do parâmetro considerado, $k=(1,m)$;

P – peso atribuído a cada parâmetro;

I_k – valor do k -ésimo parâmetro de cada célula do mapa de risco de cada parâmetro considerado.

O valor do peso (π_i) de cada variável foi ponderado em função do autovalor de cada componente (raiz característica) associado à explicabilidade de cada variável, em relação às componentes principais. O autovalor é utilizado como termo de ponderação para expressar a capacidade dos fatores em captar níveis diferentes das variâncias das variáveis. O peso de cada variável que compõe o índice de salinidade foi estimado pela equação 12.

$$\pi_i = \frac{(F_1 \cdot C_1) + (F_2 \cdot C_2) \dots + (F_i \cdot C_i)}{\left(F_1 \cdot \sum_1^n C_1 \right) + \left(F_2 \cdot \sum_1^n C_2 \right) \dots + \left(F_i \cdot \sum_1^n C_i \right)} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

π_i – peso a ser associado a cada parâmetro;

F_i – autovalor de cada componente principal;

C_i – explicabilidade de cada variável.

Palácio (2004) utilizou a mesma equação (12) na confecção dos pesos das variáveis componentes de um índice de qualidade de água na parte baixa da bacia hidrográfica do rio Trussu, Ceará. Lopes (2008) também utilizou a mesma equação (12) na confecção dos pesos das variáveis componentes de um índice de sustentabilidade ambiental para o perímetro irrigado do Baixo Acaraú, Ceará.

Sendo, neste estudo, a fonte de dados os mapas temáticos para o estado do Ceará, cada um dos indicadores propostos leva em consideração a melhor performance observada entre os mapas temáticos de forma geral. De acordo com os escores atribuídos no item 5.2, o índice potencialmente pode variar de 1 a 4.

5.4.4. Validação dos mapas de risco de salinização

A validação dos mapas produzidos pelos diferentes métodos foi realizada por meio dos coeficientes de Exatidão Global (EG), de Exatidão Específica (EE) e índice Kappa (K), calculados a partir da matriz de confusão, anteriormente descrita no tópico 5.1.7. O índice Kappa foi obtido com a equação 5, também descrita no tópico 5.1.7; os coeficientes de exatidão global (EG) e de exatidão específica (EE) foram obtidos conforme as equações 13 e 14.

A EG é obtida pela divisão das somas das entradas que formam a diagonal principal da matriz, ou seja, o número de classificações corretas, pelo número total de amostras utilizadas (WATZLAWICK, 2003).

$$EG = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} * 100 \text{ (Eq.13)}$$

Em que:

EG – Exatidão Global;

r – número de linhas da matriz de erro;

x_{ii} – Valor da linha i e coluna i;

N – Quantidade total de pontos amostrais.

A EE é obtida pela divisão no número total de amostras classificadas corretamente na classe, pelo número total de amostras desta.

$$EE = \frac{x_{ii}}{n} * 100 \text{ (Eq.14)}$$

Em que:

EE – Exatidão Específica;

xii – valor na linha i e coluna i; e

N – quantidade total de pontos amostrais da classe r.

As matrizes de confusão foram geradas correlacionando os mapas de risco produzidos com valores pontuais de Condutividade Elétrica do extrato de saturação do solo (CEes). Os valores de CEes foram cedidos pelo Laboratório de Solos do Departamento de Solos da Universidade Federal do Ceará, e correspondem a análises químicas realizadas em amostras de solos coletadas por todo o Estado, durante o período de 2004 a 2010. Ao todo foram considerados 137 valores pontuais de CEes cuja localização no Estado do Ceará é apresentada na Figura 18.

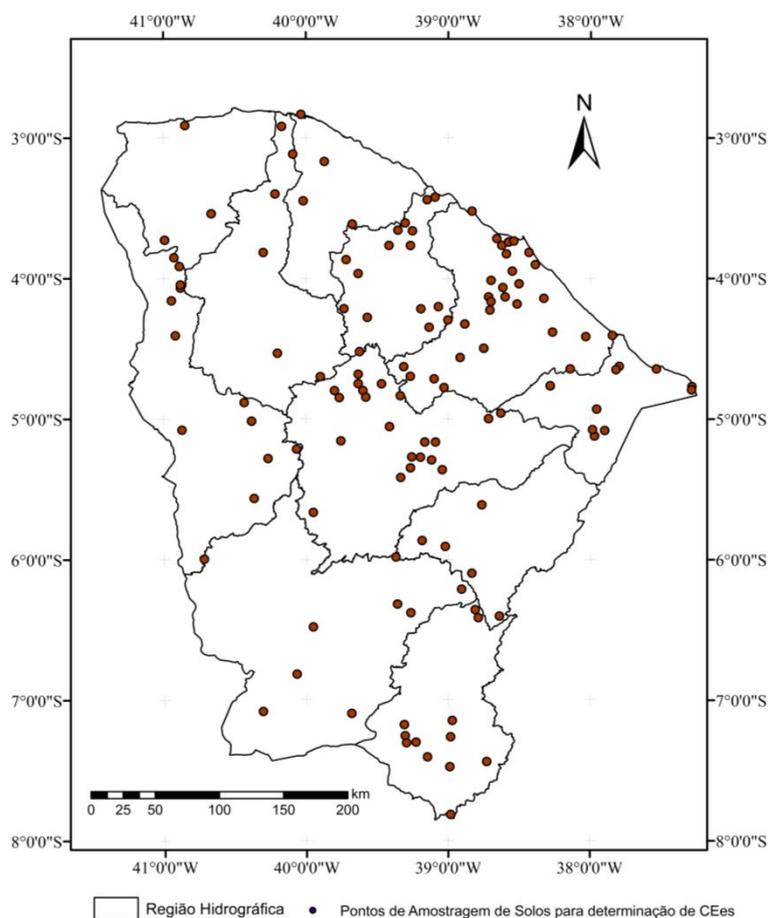


Figura 18 - Localização dos pontos de coleta das amostras de solos no Estado do Ceará

Os resultados quantitativos das análises de CEes, em dS m^{-1} , foram normalizados, de acordo com a Tabela 16, em índices qualitativos, de modo a possibilitar a produção das matrizes de confusão.

Tabela 16– Classes de Risco de Salinização de acordo com valores de CEes em dS m^{-1}

CEes (dS m^{-1})	Risco
< 1	Baixo
1 a 2	Moderado
2 a 3	Alto
> 3	Severo

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Geologia

O risco de salinização para o tema geologia (Figura 19) apresenta os valores dos escores atribuídos às unidades de mapeamento litológico.

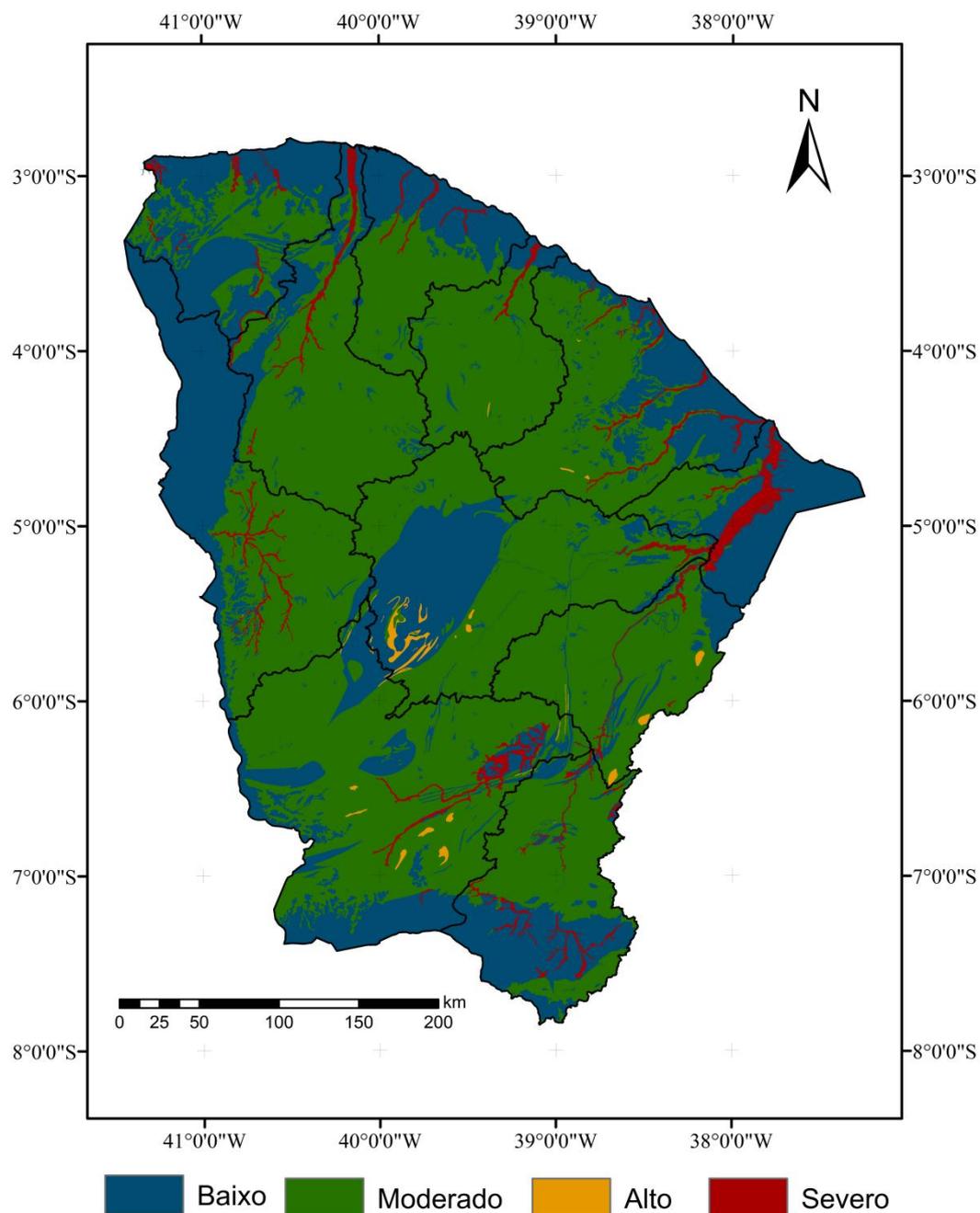


Figura 19 - Mapa de Risco de Salinização dos Solos referente ao critério geologia

De acordo com o tema geologia, a maior parte da área de estudo, 63,58%, apresenta-se dentro da classe de risco moderado à salinização dos solos; nesta área, constituída pelo embasamento cristalino, predominam as ortognaisses, metacalcários, paragnaisses e gnaisses, com grau metamórfico médio a forte.

As áreas de baixo risco representam 33,06% do Estado e nela predominam arenitos e conglomerados que, segundo Gomes (2005), se caracterizam como estáveis aos processos de intemperismo. Segundo Suassuna (1994), muito dificilmente se encontram solos salinos sobre arenitos e conglomerados, condição que geralmente resulta na formação de aquíferos livres com a ocorrência de semi-confinamentos localizados (MELO et al, 2007).

As áreas de risco severo abrangem 2,19% da área e nelas predominam as argilas, areias argilosas e cascalhos. Esses sedimentos são caracterizados como inconsolidados os quais estão entre os mais instáveis ao intemperismo. São muito comuns em depósitos de idade quaternária típicos dos leitos e terraços de inundação de rios e lagoas, e geralmente possuem espessuras reduzidas, pois sempre estão condicionadas às partes mais baixas dos vales (SRH, 2001). As áreas de risco alto abrangeram 1,17% da área total do Estado.

6.2. Relevo

Na Figura 20 é apresentada a distribuição espacial da altitude no Estado do Ceará. O relevo, oscilando entre zero e 1.132,25 m de altitude, está dividido em planícies litorâneas e depressões sertanejas (altitude sempre inferior a 200 m); os pés-de-serra (altitude entre 200 e 400 m) e os planaltos, serras e serrotes (altitude máxima de 1000 m).

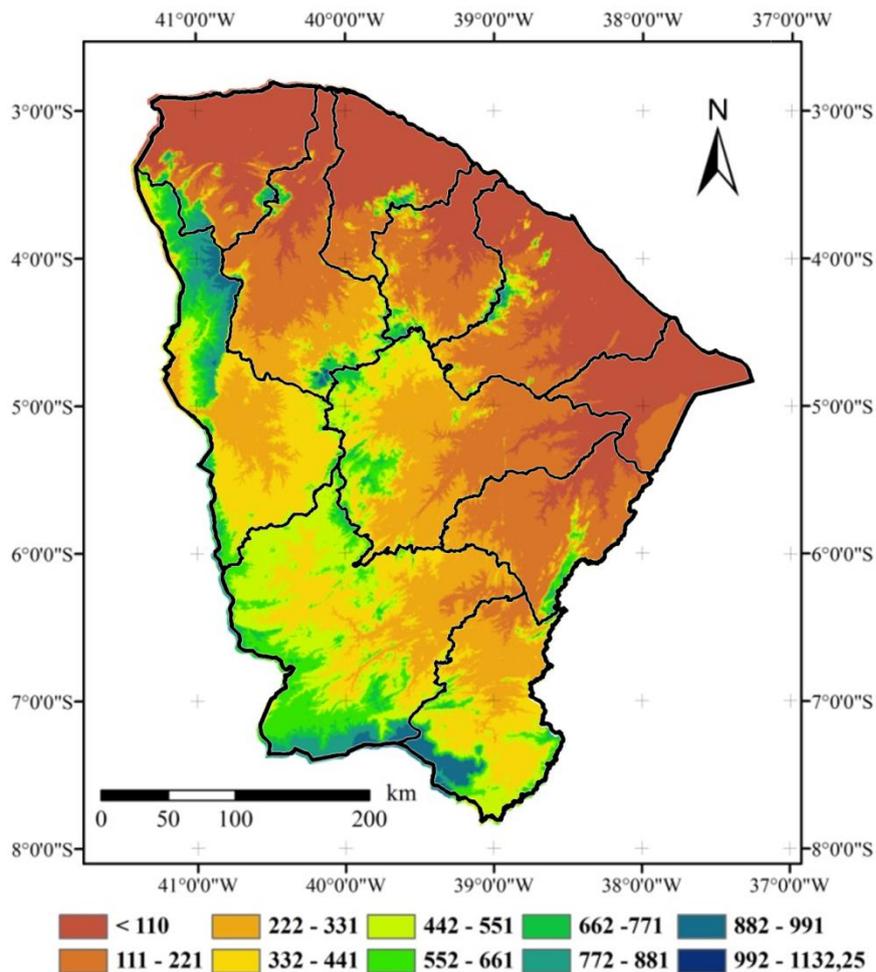


Figura 20 - Classificação do relevo do Estado do Ceará conforme a altitude, em metros.

Os pontos de maior altitude se encontram na Serra das Matas (1.129 m) e no Maciço de Baturité (1.115 m), ambos situados em maciços residuais dispersos nas depressões sertanejas do centro do Estado; na Chapada do Araripe (de 700 m até mais de 900 m) situada ao sul do Ceará na Depressão Sertaneja Meridional; na Costa da Ibiapaba (média de 750 m) situada no extremo noroeste do Estado; na Serra da Meruoca (até 870 m) e na Serra de Uruburetama (850 m) situadas na Depressão Sertaneja Setentrional.

Na Tabela 17 estão expostas as distribuições absolutas e percentuais das declividades do Ceará, conforme a classificação sugerida pela Embrapa (2006).

Tabela 17 - Distribuição absoluta e percentual dos tipos de relevo do Estado do Ceará em função da declividade.

Relevo	Classe de Declividade (%)	Área	
		Valor Absoluto (km ²)	Valor Relativo (%)
Plano	< 3	67.891,88	45,6
Suave Ondulado	3 – 8	54.015,91	36,2
Ondulado	8 – 20	17.683,51	11,8
Forte Ondulado	20 – 45	8.171,92	5,5
Montanhoso	45 – 75	1.016,11	0,69
Escarpado	> 77	46,67	0,03

O mapa de relevo do Estado do Ceará, classificado quanto aos valores percentuais de declividade, é apresentado na Figura 21. Observa-se grande predominância de relevo plano e suave ondulado, com declividades de até 8%, abrangendo 81,9% da área do Estado; seguido do relevo ondulado e forte ondulado, com respectivamente 11,8 e 5,4%; enquanto menos de 1% da área possui relevo montanhoso ou escarpado, com declives fortes e muito fortes, superiores a 45%.

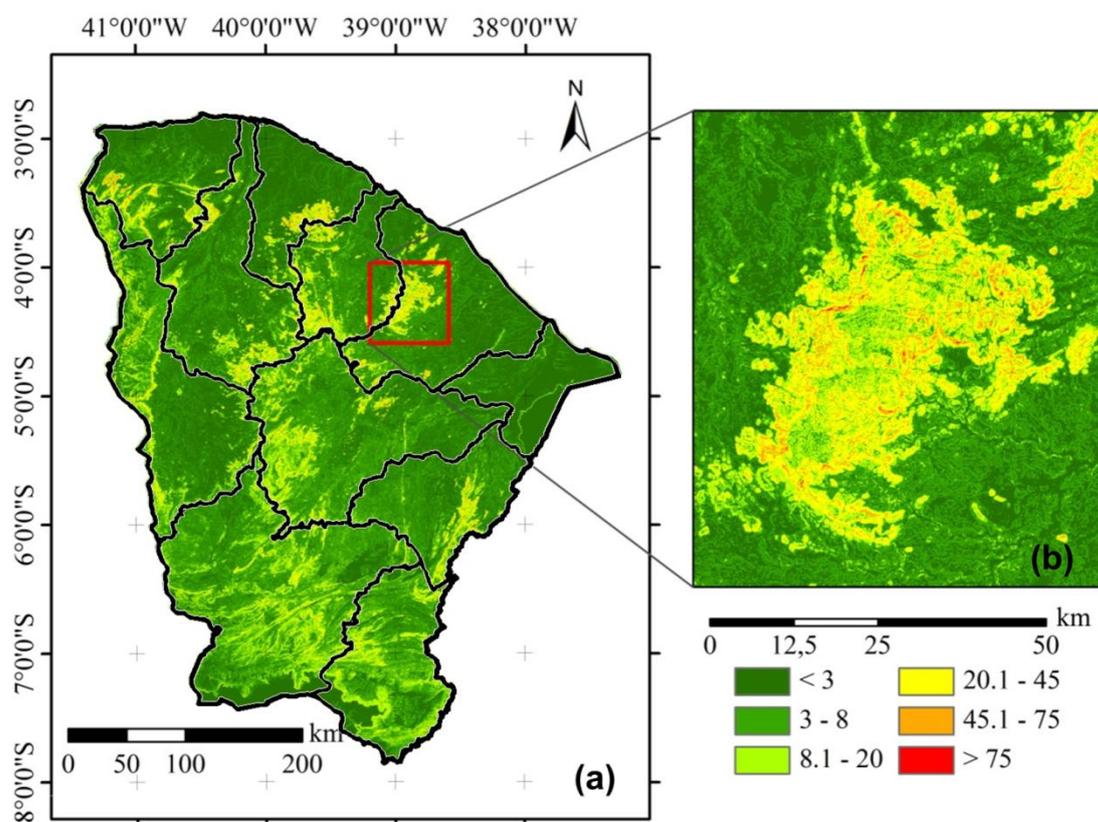


Figura 21 - Classificação do relevo do Estado do Ceará quanto aos valores percentuais de declividade (21a) e detalhamento do relevo da área do Maciço de Baturité (21b).

Os declives mais acentuados são encontrados nas serras como, por exemplo, a formação do Maciço de Baturité destacada na Figura 21. Na Figura 22 é apresentado o mapa de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará quanto ao critério Relevo e, na Tabela 18, a distribuição absoluta e percentual de cada classe de risco.

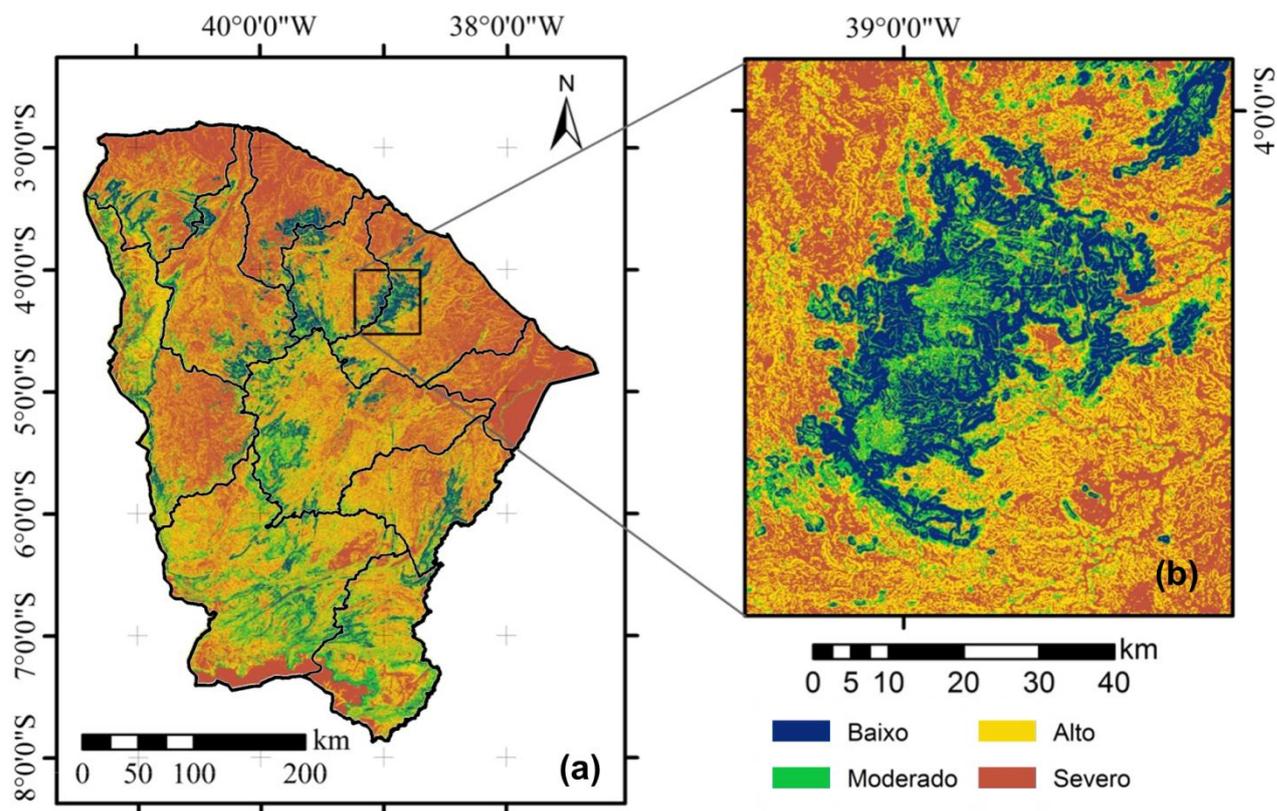


Figura 22 - Mapa de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará referente ao critério Relevo.

Na Tabela 18 são apresentados os valores da distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização em função do Relevo. Observou-se que 45,62% da área do Estado se enquadraram na classe de risco severo, abrangendo terrenos com declividades inferiores a 3% e, portanto, receberam a nota de risco máxima (valor 4). As declividades inferiores a 3% caracterizam os relevos planos onde os desnivelamentos são muito pequenos. Segundo Leão (2010), o comportamento hidrológico desta classe de declividade favorece o aumento do tempo de concentração da água devido à baixa velocidade de escoamento, em relação a áreas com declividades superiores, processo que favorece o fenômeno da salinização dos solos. Já os terrenos com declives entre 3 e

8%, classificados como de alto risco de salinização, abrangeram 36,29% da área. Esse resultado leva à conclusão de que quanto ao relevo, parâmetro dificilmente alterado pela ação antrópica, a situação de risco de salinização é grave, já que 81,91% da área do Estado do Ceará está sob risco alto ou severo.

Tabela 18– Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará em função do Relevo.

Classificação do Risco	Nota de Risco de Salinização	Área	
		Valor Absoluto (km ²)	Valor Relativo (%)
Baixo	1	9.234,67	6,21
Moderado	2	17.683,495	11,88
Alto	3	54.015,892	36,29
Severo	4	67.891,928	45,62

Os terrenos caracterizados por declives acima de % ocupam 18,09% da área do Estado. Ainda de acordo com Leão (2010), com estes declives o relevo passa de suave ondulado e ondulado para forte ondulado, montanhoso e escarpado e assim o escoamento, bem como os valores médios da densidade de drenagem aumentam, refletindo menor probabilidade de acúmulo de sais no solo devido à evaporação da água após eventos de encharcamentos e/ou inundações.

6.2. Pedologia

Na figura 23 é apresentado o mapa de solos do Estado do Ceará segundo uma aproximação da nova classificação do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2006). Nela pode-se observar que 5 associações de solos predominam em 85,32% da área total do Estado: 29,02% dos solos são ARGISSOLOS; 17,93%, LUVISSOLOS; 17,07%, NEOSSOLOS LITÓLICOS eutróficos; 12,15%, PLANOSSOLOS HÁPLICOS; 9,14% são NEOSSOLOS QUATZARÊNICOS; enquanto os 14,68% restantes são solos de outras classes (Figura 23).

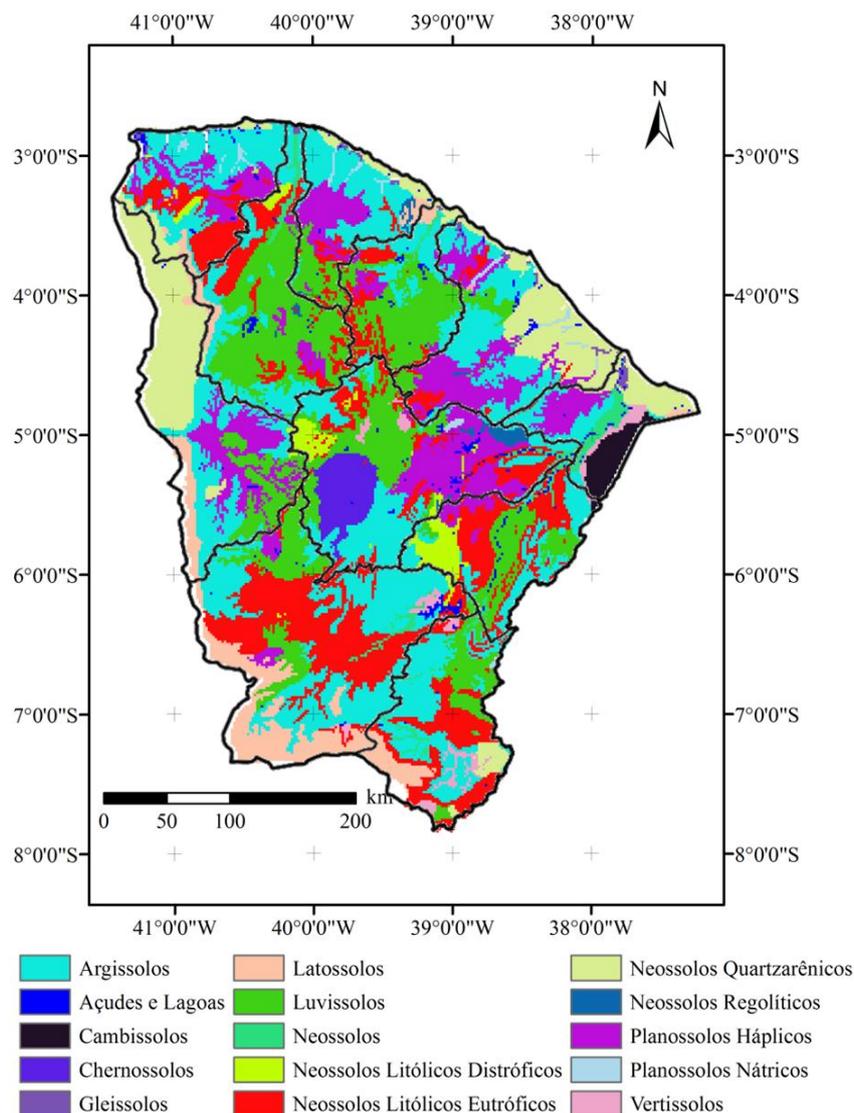


Figura 23 - Atualização da classificação dos solos do Estado do Ceará. (Aproximação do novo SiBCS, de acordo com a EMBRAPA (2006)), adaptado de Jacomine et al. (1973)

Na figura 24 é apresentada a classificação dos solos do Estado do Ceará quanto à drenagem: 44,13% dos solos foram classificados como bem drenados; 16,15% como acentuadamente drenados; 12,5% como mal drenados; 9,67% como excessivamente drenados; 8,07% como imperfeitamente drenados; 5,1% como moderadamente drenados; 3,37% como fortemente drenados; 1% do mapa constitui açudes e lagoas; e apenas 0,02% foram classificados como mal drenados.

De acordo com Jacomine et al. (1973), os solos bem drenados são aqueles nos quais a água é removida com facilidade porém, não rapidamente. Estes solos podem estar sujeito a curtos períodos de encharcamento, e portanto receberam nota de risco de

salinização igual a 2, o que corresponde ao risco moderado. Os solos desta classe comumente apresentam texturas argilosas ou médias, normalmente, não apresentam mosqueados; entretanto, quando presentes, localizam-se a grande profundidade. Como exemplo podem ser citados alguns ARGISSOLOS, LATOSSOLOS e ARGISSOLOS AMARELOS Coesos.

Nos solos caracterizados por drenagem acentuada, a água é removida rapidamente do perfil, e a maioria dos perfis tem pequena diferenciação de horizontes, sendo normalmente de textura argilosa e média, porém sempre muito porosos e bem permeáveis e, portanto, receberam nota de risco 1, correspondendo ao risco baixo.

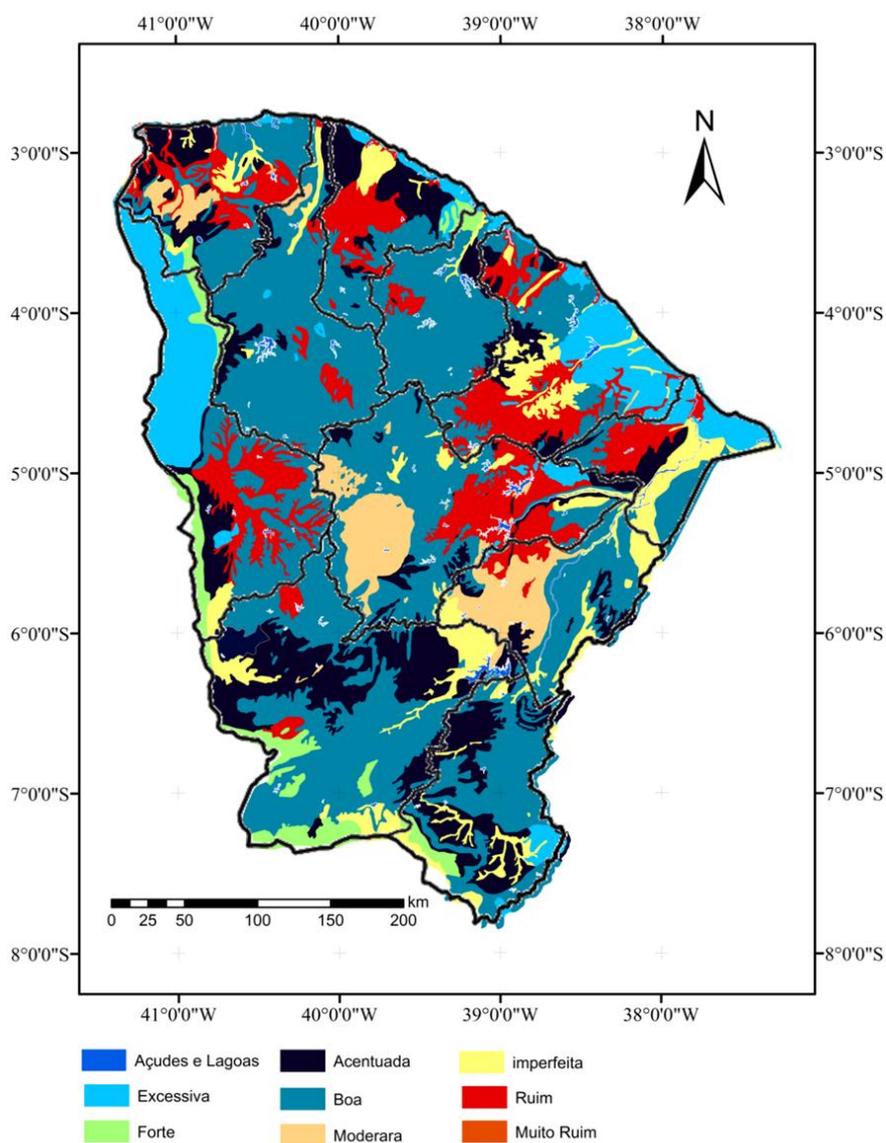


Figura 24– Classificação dos solos do Estado do Ceará segundo as classes de drenagem, adaptado de Jacomine et al. (1973)

Já os solos mal drenados são aqueles nos quais a água é removida do perfil tão lentamente que o solo permanece molhado por grande parte do tempo e portanto, receberam nota de risco igual a 3,5, o que corresponde ao alto risco de salinização. Nesses solos, as condições de má drenagem são devidas a lençol freático elevado, camada de baixa permeabilidade no perfil, adição de água através de translocação lateral interna ou alguma combinação dessas condições.

Na figura 25 é apresentado o mapa do risco de salinização dos solos do Ceará, quanto ao critério Pedologia. Foram classificados como risco moderado, 49,22% dos solos da área de estudo, estando inclusos os solos de drenagem boa e moderada; 29,19% foram classificados como baixo risco de salinização, estando inclusos solos forte e excessivamente drenados como as AREIAS QUARTZOZAS, os LATOSSOLOS, os PODZÓLICOS e os NEOSSOLOS. Enquanto, 7,9% dos solos do Estado foram classificados como de alto risco de salinização, 13,68% da área de estudo foram classificados como risco severo, estando inclusos nesta classe, os solos que naturalmente apresentam caráter salino, sálico, sódico ou solódico, como os SOLOS INDISCRIMINADOS DE MANGUES, os GLEIOSSOLOS (antigos SOLONCHAKS) e PLANOSSOLOS HÁPLICOS (antigos PLANOSSOLOS SOLÓDICOS).

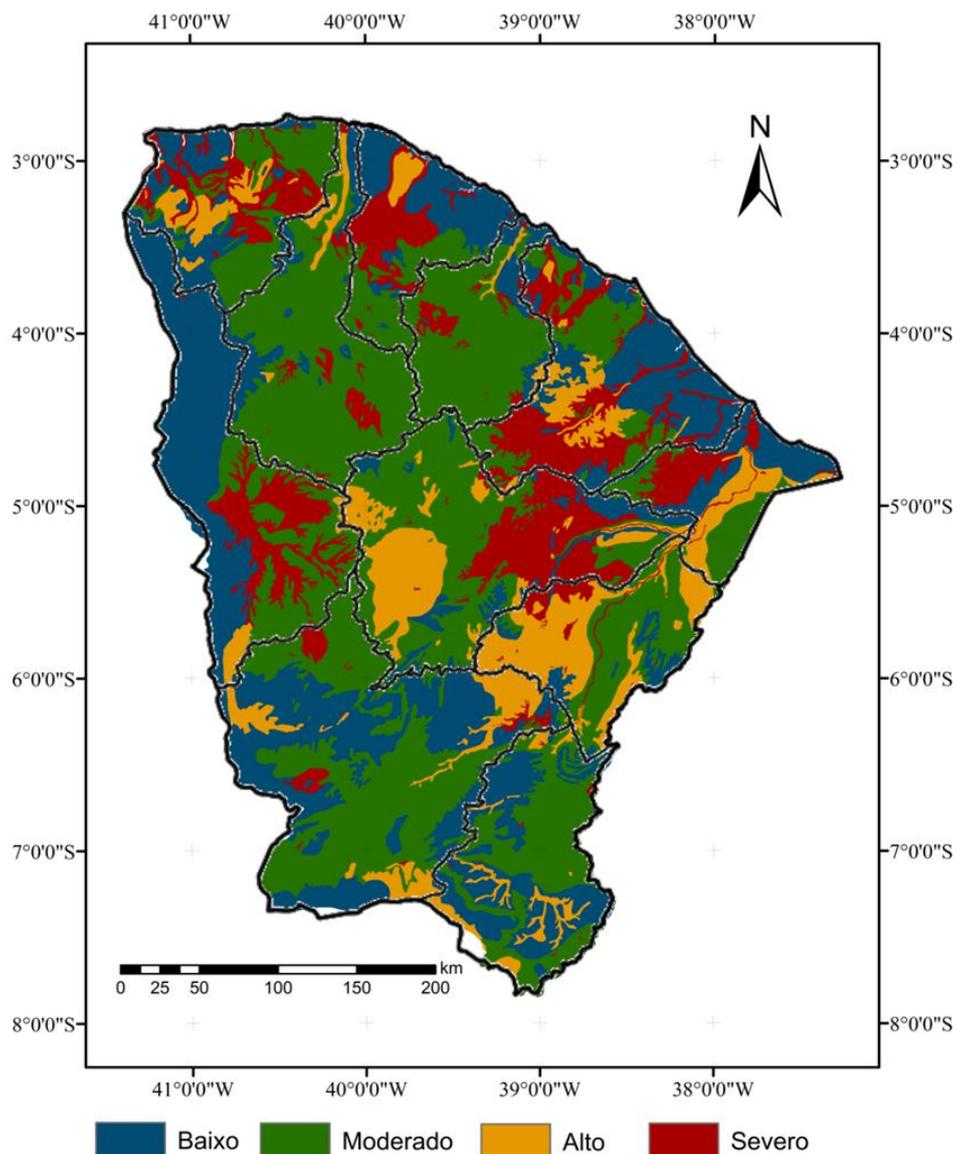


Figura 25- Risco de salinização dos solos do Estado do Ceará, referente ao tema Pedologia, adaptado de Jacomine et al. (1973)

6.4. Precipitação Atmosférica

Na Tabela 19, são apresentados os resultados da análise descritiva para a Precipitação. O coeficiente de variação (CV) pode ser considerado moderado; e essa variação existente caracteriza-se, principalmente, pelas diferenças do padrão pluviométrico do litoral e das serras úmidas, cujos dados, devido a peculiaridades climáticas, não seguem a mesma tendência das demais regiões do Estado. Também foram obtidos os coeficientes de assimetria e curtose, indicando que os dados não podem ser considerados normalmente distribuídos. Condição semelhante foi encontrada

por Carvalho & Assad (2005), ao realizarem uma análise espacial da precipitação pluviométrica no Estado de São Paulo. O valor de curtose maior que zero, indica uma distribuição leptocúrtica da variável, mostrando uma tendência desses atributos apresentarem maior dispersão dos dados em torno da média.

Tabela 19 - Estatísticas descritivas da precipitação pluviométrica anual em 148 postos no Estado do Ceará.

Atributo	n	Média	Med.	Mín.	Máx.	s	CV	Cs	Ck
Precipitação	148	914.30	856.07	477.59	1680.69	252.64	0.276	1.05	3.83

Precipitação em mm; n: número de observações; Med.: mediana; Mín.: mínimo; Máx.: máximo; s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose.

Para a análise geoestatística dos dados de precipitação, realizada através da variografia, foram utilizados três modelos teóricos: o esférico, o exponencial e o gaussiano. Na Tabela 20 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas ajustados para cada modelo.

Tabela 20- Modelos de semivariogramas e parâmetros ajustados aos dados de precipitação pluviométrica no Estado do Ceará

Parâmetros	Modelo		
	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Efeito Pepita	27896	23824	30369
Patamar	65000	64000	64000
Alcance	143182	144713	107204

Para a análise da estrutura de correlação espacial, seguiu-se o critério adotado por Cambardella et al. (1994) e por Zimback (2001) segundo o qual o grau de dependência espacial pode ser classificado através da razão entre o efeito pepita e o patamar como: forte, para valores menores que 0,25; moderado, para valores entre 0,25 e 0,75; e fraco, para valores maiores que 0,75. Neste caso, de acordo com os dados da Tabela 20, os dados apresentam correlação espacial e, para todos os modelos analisados a dependência espacial é caracterizada como moderada.

Constatada a dependência espacial, procedeu-se com o ajuste dos semivariogramas dos três modelos teóricos, sua validação e espacialização dos dados.

Na Figura 26 são apresentados os mapas de distribuição espacial da precipitação no Estado do Ceará utilizando-se o método da Krigagem com ajustes para os modelos exponencial (Figura 26a), gaussiano (Figura 26b) e esférico (Figura 26c). As áreas em tonalidades mais claras expressam os menores valores de precipitação enquanto as áreas com tonalidade mais escura, os maiores. A análise visual permite constatar variações entre os diferentes modelos de ajuste do interpolador, sendo sensíveis as diferenças nas proximidades dos postos pluviométricos que registraram os valores extremos (mínimos e máximos) de lâmina precipitada, como na faixa litorânea ao norte e na região central do Estado. A variação passível de identificação pela simples análise visual já comprova que a utilização indiscriminada de um método para a interpolação pode mascarar o resultado estimado, subestimando ou superestimando os resultados finais.

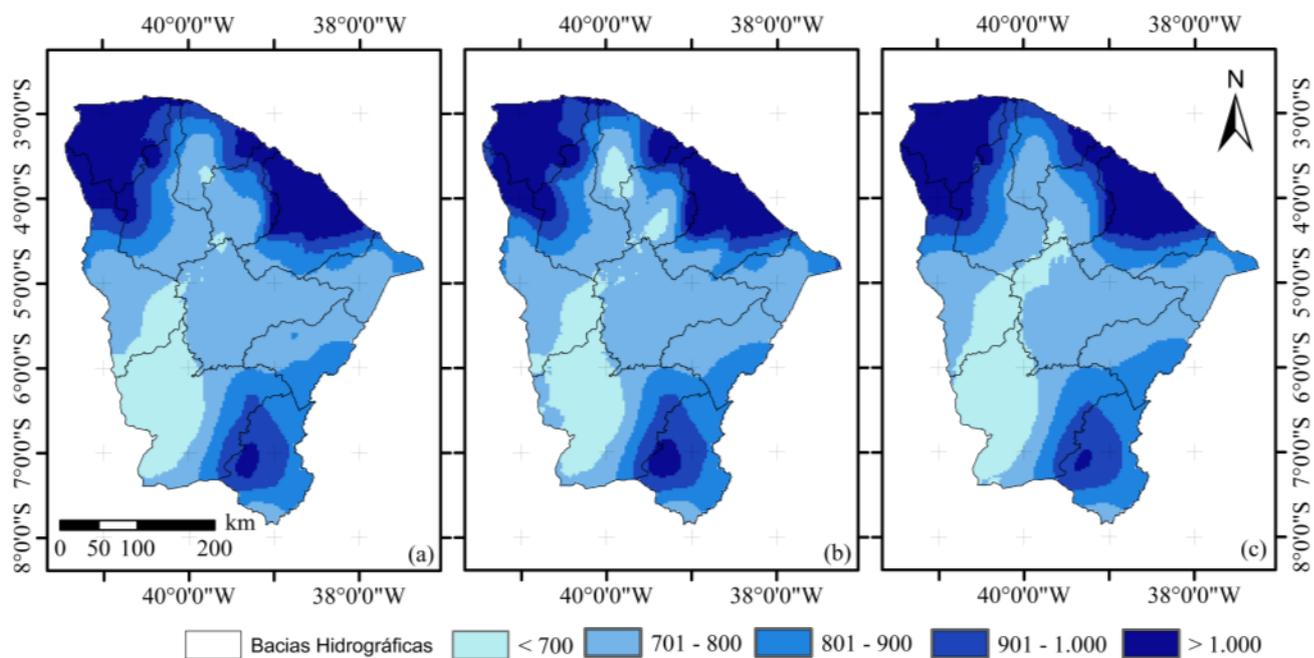


Figura 26 - Distribuição espacial da precipitação média anual no Ceará, obtidas por meio de krigagem segundo os modelos exponencial (26a); gaussiano (26b) e esférico (26c).

Na Figura 27 são apresentados os valores de REMQ obtidos com o uso de cada um dos modelos de ajuste. Verifica-se que, segundo este parâmetro, a precipitação média anual foi melhor estimada com o ajuste do semivariograma pelo modelo esférico, já que este apresentou o menor erro quadrático médio em relação aos demais. Esse resultado corrobora com os de Carvalho & Assad (2005) e Sartori et al. (2009) que

também observaram menores valores de REMQ para o modelo esférico. O resultado no entanto, vai de encontro com os adquiridos por Prudhomme & Reed (1999) e CASTRO et al. (2010) que, ao avaliarem o desempenho de interpoladores para a precipitação na Escócia e no Estado do Espírito Santo, observaram que o modelo Exponencial apresentou menor valor de REMQ. Este fato enfatiza a necessidade da avaliação dos métodos e modelos de interpolação para cada condição de estudo.

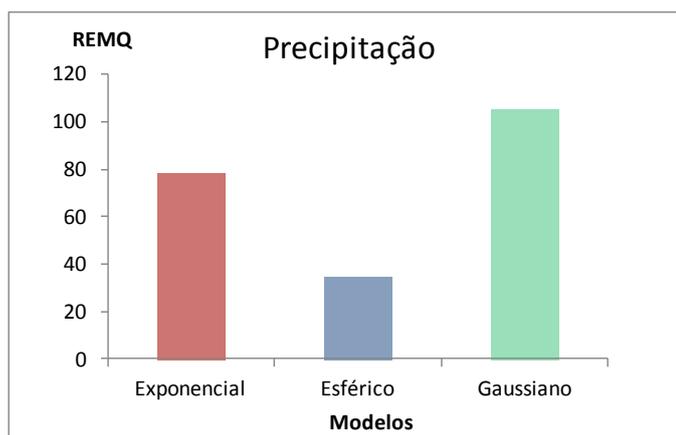


Figura 27- Valores de REMQ para os modelos usados na interpolação dos dados de Precipitação no Estado do Ceará.

Portanto, para o cálculo do Índice de Aridez do Estado do Ceará adotou-se o mapa de precipitação espacializado pelo modelo esférico. O modelo esférico também foi citado como o mais adequado por Atkinson e Lloyd (1998) ao mapearem a precipitação na Suíça a partir de 100 dados amostrais.

Na Figura 28 observa-se a distribuição espacial da precipitação anual para o Estado do Ceará pelo modelo esférico, que corrobora com estudo da FUNCEME (1991) segundo o qual o Estado possui 75% de sua área total incluída na isoietas abaixo de 800 mm anuais. Observa-se que, as áreas contempladas com as maiores médias anuais de precipitação se concentram nos setores noroeste (região da Serra da Ibiapaba), Cariri (Chapada do Araripe – sul do Estado) e em toda a faixa litorânea e a região do Maciço de Baturité. Nas regiões do Sertão dos Inhamuns, Sertão Central e Jaguaribe estão as áreas menos favorecidas pelas quantidades de precipitação o que sugere que estas sejam as regiões com menores índices de aridez. Tal distribuição das chuvas pode ser explicada pela influência dos tipos de precipitações em cada região do Estado. As regiões da Serra da Ibiapaba e do Maciço de Baturité sofrem uma forte influência do efeito orográfico nos regimes pluviométricos. Enquanto que a região litorânea está sob a

influência das massas úmidas vindas do oceano, bem como a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

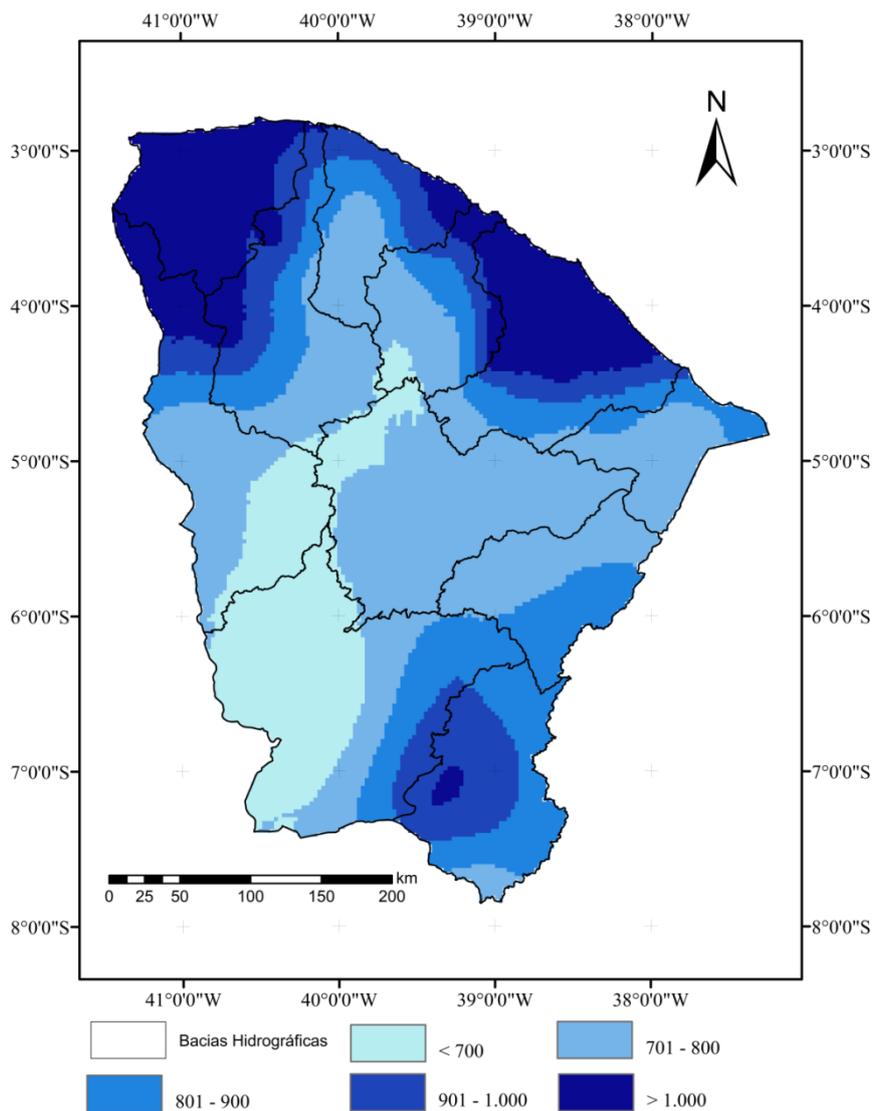


Figura 28 - Distribuição espacial da precipitação no Ceará, em mm.ano^{-1} , segundo o modelo esférico.

6.5. Evapotranspiração

Na Tabela 21, são apresentados os resultados da análise descritiva para a Evapotranspiração. O valor mínimo de evapotranspiração foi observado no município de Guaramiranga, e o valor máximo, no município de Quixeramobim.

Tabela 21– Estatísticas descritivas da evapotranspiração anual em 16 postos no Estado do Ceará

Atributo	n	Média	Med.	Mín.	Máx.	s	CV	Cs	Ck
Evapotranspiração	16	1951.01	2005.4	1200.9	2215.19	249.03	0.217	1.53	5.27

Evapotranspiração em mm; n: número de observações; Med.: mediana; Mín.: mínimo; Máx.: máximo; s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose.

Para a análise geoestatística dos dados de evapotranspiração, realizada através da variografia, foram utilizados três modelos teóricos: o esférico, o exponencial e o gaussiano. Na Tabela 22 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas ajustados para cada modelo.

Tabela 22– Modelos de semivariogramas e parâmetros ajustados aos dados de evapotranspiração potencial no Estado do Ceará

Parâmetros	Modelo		
	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Efeito Pepita	5704,72	4817,30	6494,69
Patamar	34250	26500	30000
Alcance	82398,92	169917,04	87979,21

Para a análise da estrutura de correlação espacial, seguiu-se o critério adotado por Cambardella et al. (1994) e por Zimback (2001) segundo o qual o grau de dependência espacial pode ser classificado através da razão entre o efeito pepita e o patamar como: forte, para valores menores que 0,25; moderado, para valores entre 0,25 e 0,75; e fraco, para valores maiores que 0,75. De acordo com os dados da Tabela 22 os dados de evapotranspiração apresentam correlação espacial e, para todos os modelos analisados a dependência espacial é caracterizada como forte.

Constatada a dependência espacial, procedeu-se com o ajuste dos semivariogramas dos três modelos teóricos, sua validação e espacialização dos dados.

Na Figura 29 são ilustrados os valores de REMQ obtidos com o uso de cada um dos modelos de ajuste. Verifica-se que, segundo este parâmetro, a evapotranspiração potencial anual foi melhor estimada com o ajuste do semivariograma pelo modelo esférico, já que este apresentou o menor erro quadrático médio em relação aos demais.

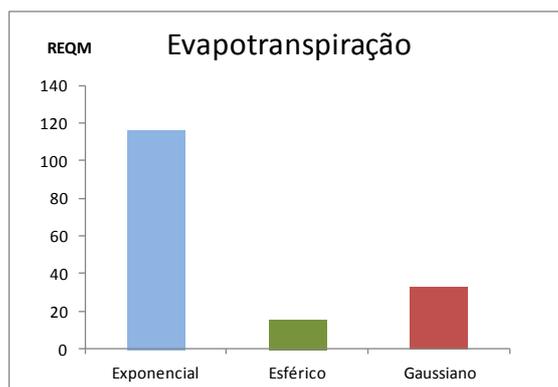


Figura 29- Valores de REQM para os modelos usados na interpolação dos dados de Evapotranspiração no Estado do Ceará.

Diante destes resultados, adotou-se neste estudo, o mapa de evapotranspiração espacializado pelo modelo esférico, por apresentar o menor REQM. A espacialização da Evapotranspiração Potencial média (mm ano^{-1}) do Estado do Ceará é apresentada na Figura 30. O valor máximo observado foi de 2215 mm ano^{-1} enquanto o mínimo foi de 1200 mm ano^{-1} .

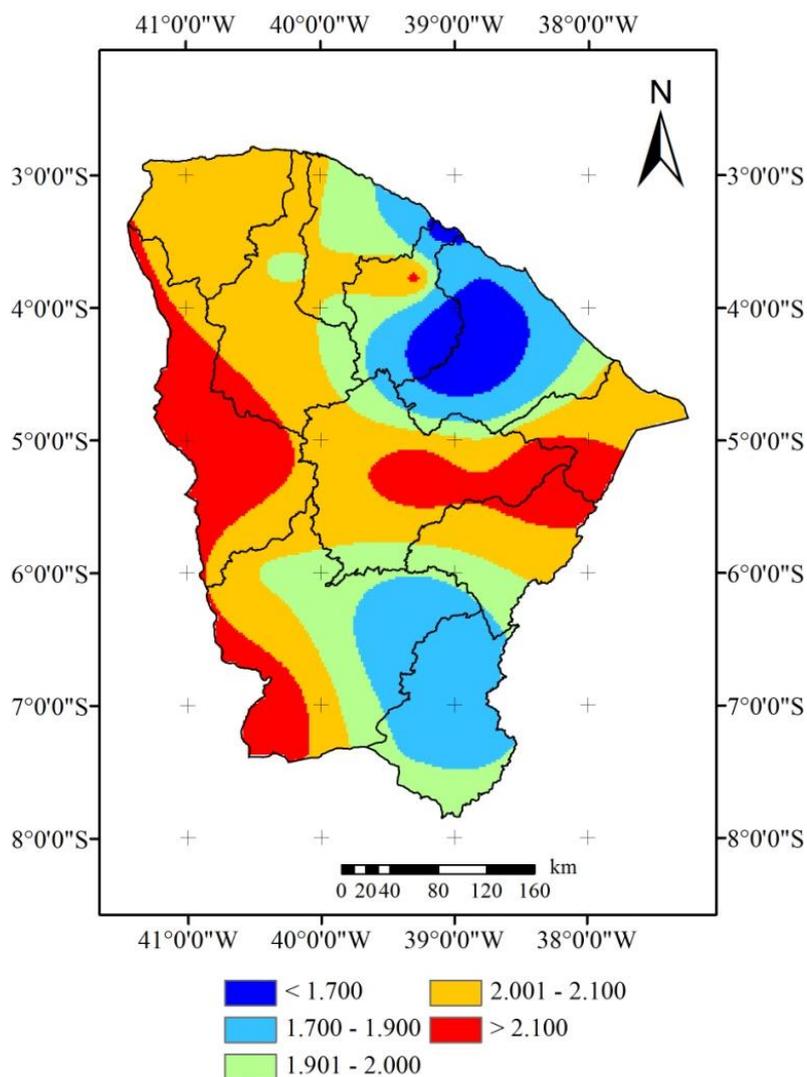


Figura 30– Distribuição espacial da evapotranspiração no Estado do Ceará.

De uma forma geral pode-se dizer que a ETo aumenta no sentido de norte-nordeste para sul-sudeste e sul-sudoeste o que corrobora com resultados de Dantas Neto (1998). Os maiores valores tendem a concentrar-se nas regiões do Sertão dos Inhamuns, Sertão Central e Litoral Leste-Jaguaribe. As regiões localizadas acima do paralelo 5°S tendem a apresentar os menores valores de ETo, principalmente a região norte-nordeste do Estado.

6.6. Índice de aridez

Na Figura 31 observa-se a distribuição espacial do Índice de Aridez para o Estado do Ceará conforme a metodologia apresentada pela UNESCO (1979). O resultado obtido determina que o semiárido cearense envolve uma área de 117.059,63 km² equivalentes a 78,66% da área do Estado. Enquanto que o clima Subúmido seco ocupa 17,39% (25.877,39 km²) e o clima Subúmido úmido ocupa apenas 3,96% (5.888,96km²) da área total.

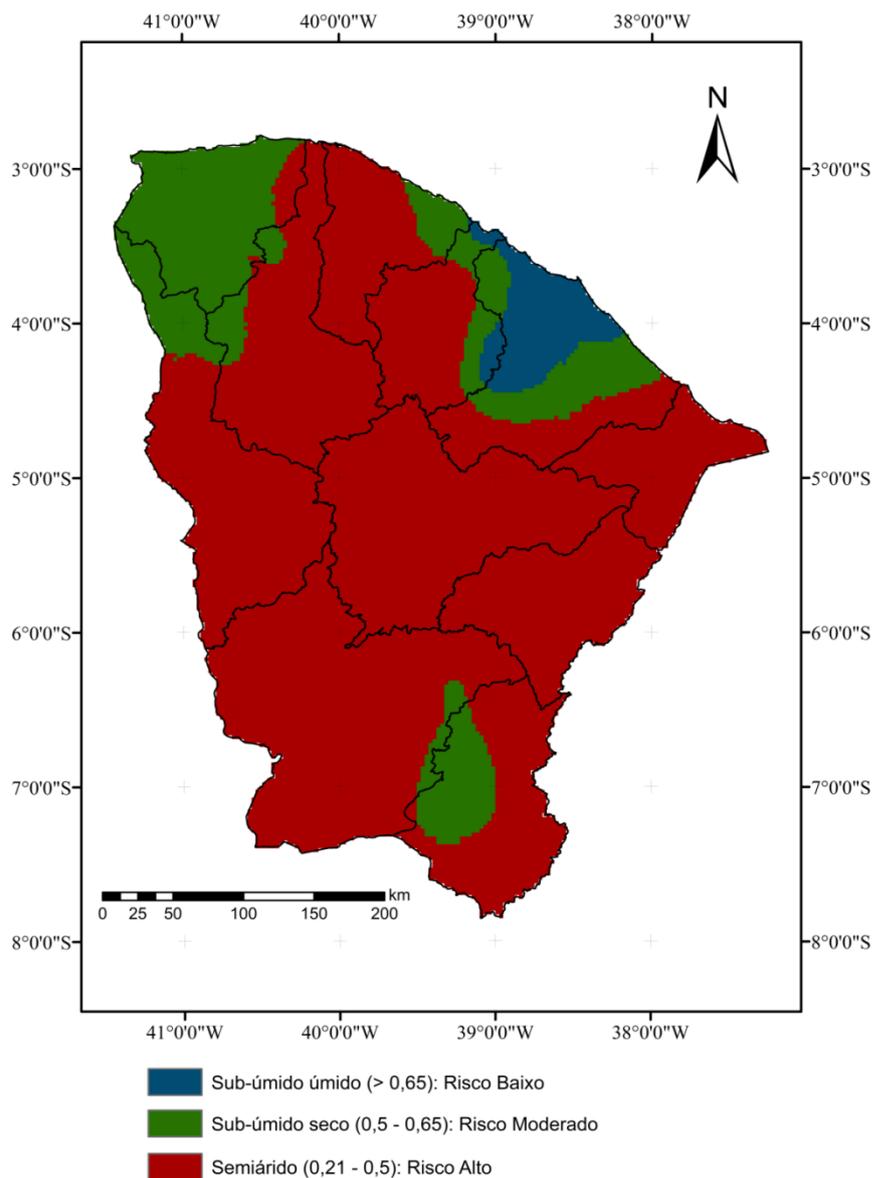


Figura 31– Índice de Aridez para o Estado do Ceará conforme metodologia da UNESCO (1979); e respectivos riscos de salinização dos solos do Estado do Ceará quanto ao critério clima.

Ao se comparar o mapa do Índice de Aridez (Figura 31) com o mapa da distribuição espacial da precipitação média (Figura 28) observa-se que a delimitação

espacial do semiárido conforme a metodologia empregada extrapolou a superfície configurada pela isoietal modal de 800 mm, critério adotado para a delimitação pela Agência de Desenvolvimento do Nordeste – ADENE.

Como a semiaridez é uma qualidade do clima, fenômeno estrutural por natureza, a Organização Mundial de Climatologia recomenda que sejam utilizadas séries temporais de dados de aproximadamente 30 anos para os cálculos dos indicadores de forma a evitar ou, no mínimo, reduzir, no cálculo das médias, possíveis distorções produzidas por eventuais fenômenos meteorológicos (conjunturais). Para este trabalho, as séries temporais de precipitação tiveram a duração de 34 anos, conforme recomendado, no entanto, devido à dificuldade de acesso e aquisição dos dados climatológicos foram utilizadas séries mais curtas para a estimativa da evapotranspiração, de em média 15 anos.

Para o critério Clima foram obtidas três classes de risco de salinização dos solos (Figura 31). A classe de risco de salinização considerada como baixa corresponde a 3,96% da área do Estado; a classe considerada como risco moderado corresponde a 17,39% da área, enquanto 78,66% da área do Estado foram classificados como de risco alto de salinização quanto ao critério clima.

6.7. Malha hídrica

Na Figura 32 é apresentado o mapa de risco dos solos do Estado do Ceará referente ao critério Malha Hídrica. Como os sais podem ser mobilizados para a superfície pela elevação dos lençóis freáticos, as áreas mais próximas aos centros dos rios são consideradas as de maior risco.

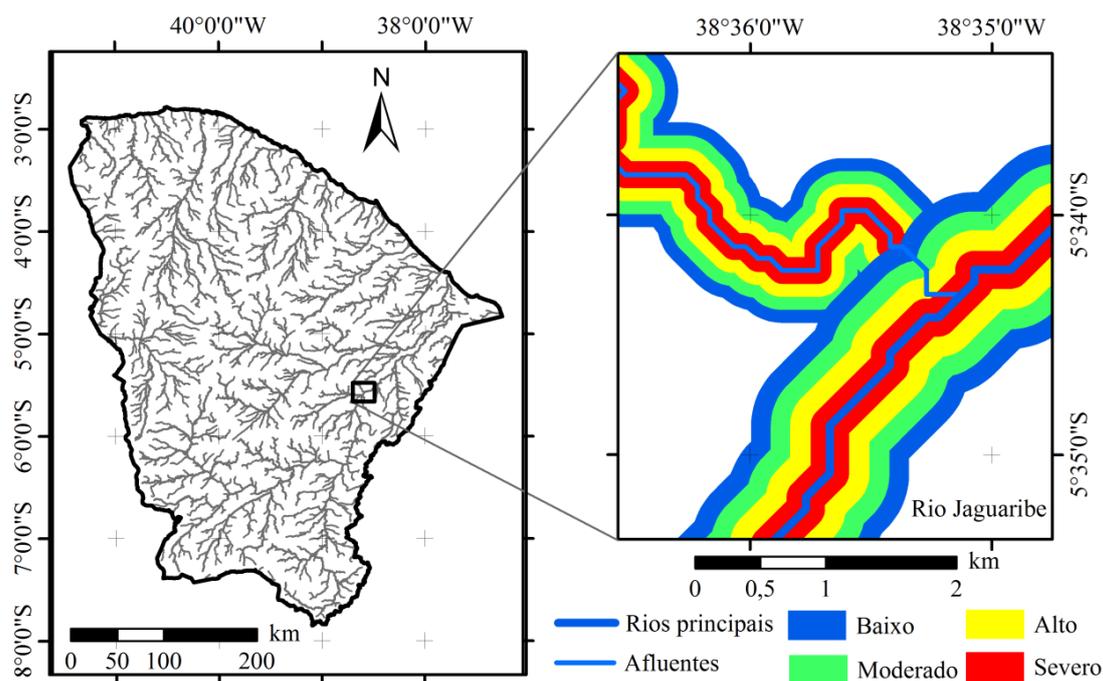


Figura 32–Risco de Salinização dos Solos referentes ao tema Malha hídrica.

Como a determinação das áreas de risco foi realizada em função da distância do solo ao centro dos rios, a distribuição espacial dos riscos também variou apenas em função dessas distâncias, conforme a natureza dos mesmos, de modo que cada uma das classes de risco para os rios secundários abrangeu 1,88% da área do Estado, o que perfaz um total de 2798 km² e cada classe de risco para os rios principais abrangeu 0,86% da área do Estado, perfazendo o total de 1280 km². Assim, quanto ao critério Malha Hídrica, cada classe de risco abrange uma área de 2,75% do Estado, o que corresponde a 16.311 km².

6.8. Qualidade da água

Na Tabela 23, são apresentados os resultados da análise descritiva para a variável qualidade de água, representada pela condutividade elétrica da água (CEa). O valor mínimo foi observado no açude Cachoeira, localizado ao sul do Estado, na bacia do Salgado, município de Aurora; enquanto o valor máximo foi observado no açude Pompeu Sobrinho, centro-norte do estado, na bacia Metropolitana, município de Choró.

Tabela 23 - Estatísticas descritivas da CEaem 126 pontos de coleta de água.

Atributo	n	Média	Med.	Mín.	Máx.	s	CV	Cs	Ck
CEa	126	0.485	0.379	0.134	2.429	0.355	0.731	2.713	12.645

CEa em $\mu\text{S cm}^{-1}$; n: número de observações; Med.: mediana; Mín.: mínimo; Máx.: máximo; s: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; Cs: coeficiente de assimetria; Ck: coeficiente de curtose.

Para a análise geoestatística dos dados de CEa, realizada através da variografia, foram utilizados três modelos teóricos: o esférico, o exponencial e o gaussiano. Na Tabela 24 são apresentados os parâmetros dos semivariogramas ajustados para cada modelo.

Tabela 24- Modelos de semivariogramas e parâmetros ajustados aos dados de CEa no Estado do Ceará

Parâmetros	Modelo		
	Esférico	Exponencial	Gaussiano
Efeito Pepita	0.254	0.259	0.315
Patamar	0,88	0,765	0,85
Alcance	168969,91	270749,95	136052,03

Para a análise da estrutura de correlação espacial, seguiu-se o critério adotado por Cambardella et al. (1994) e por Zimback (2001) segundo o qual o grau de dependência espacial pode ser classificado através da razão entre o efeito pepita e o patamar como: forte, para valores menores que 0,25; moderado, para valores entre 0,25 e 0,75; e fraco, para valores maiores que 0,75. Para a CEa, de acordo com os dados da Tabela 28, os dados apresentam correlação espacial e, para todos os modelos analisados a dependência espacial é caracterizada como moderada.

Constatada a dependência espacial, procedeu-se com o ajuste dos semivariogramas dos três modelos teóricos, sua validação e espacialização dos dados.

Na Figura 36 são apresentados os mapas de distribuição espacial da CEa no Estado do Ceará utilizando-se o método da Krigagem com ajustes para os modelos exponencial (Figura 33a), gaussiano (Figura 33b) e esférico (Figura 33c). A variação passível de identificação pela análise visual já comprova que a utilização indiscriminada de um método para a interpolação pode mascarar o resultado final da espacialização, subestimando ou superestimando os resultados finais.

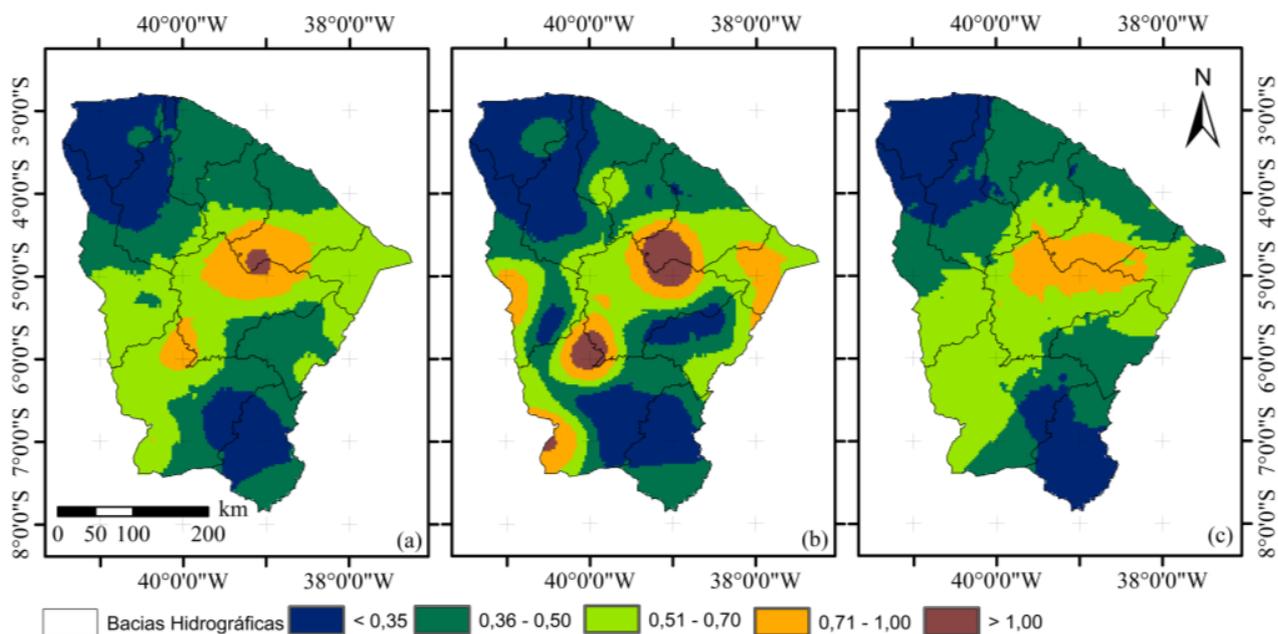


Figura 33 - Distribuição espacial da CEa no Ceará, obtidas por meio de krigagem segundo os modelos exponencial (A); gaussiano (B) e esférico (C).

Na Figura 34 são ilustrados os valores de REMQ obtidos com o uso de cada um dos modelos de ajuste. Verifica-se que, segundo este parâmetro, a CEa foi melhor estimada com o ajuste do semivariograma pelo modelo gaussiano, já que este apresentou o menor erro quadrático médio em relação aos demais.

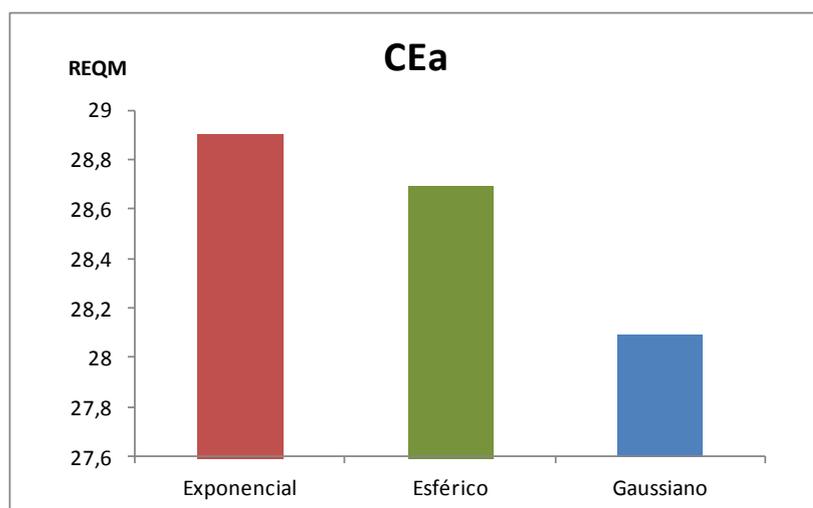


Figura 34 - Valores de REMQ para os modelos usados na interpolação dos dados de CEs no Estado do Ceará.

Assim, para a obtenção do mapa de qualidade das águas do Estado do Ceará adotou-se o mapa de CEa espacializado pelo modelo gaussiano, por este apresentar o menor REQm. Na Figura 35 observa-se a distribuição espacial da CEa para o Estado do Ceará pelo modelo gaussiano. Observa-se que as áreas com as maiores valores de CEa se concentram em torno dos açudes Pompeu Sobrinho, no município de Choró; no açude Cedro, município de Quixadá; açude Castro, município de Itapiúna e no açude Favelas, município de Tauá.

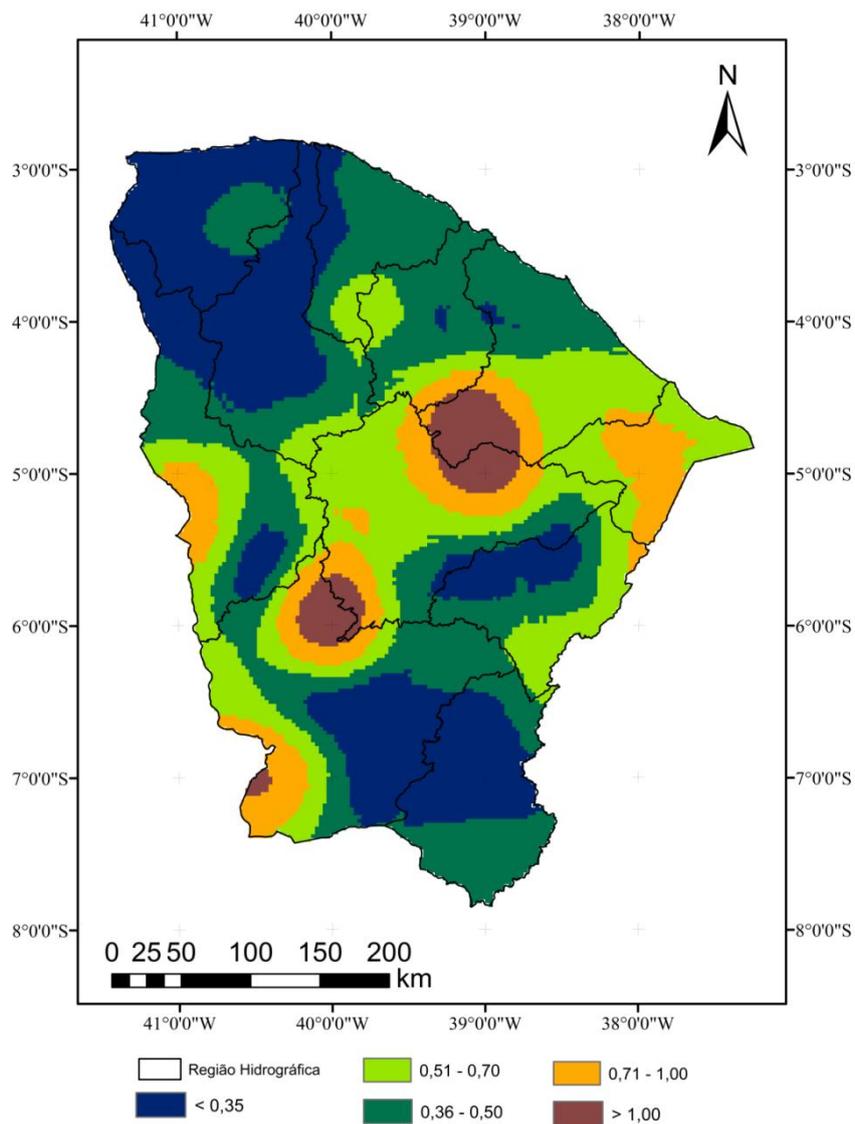


Figura 35 - Distribuição espacial da CEa no Ceará, em dS m^{-1} ; segundo o modelo gaussiano

A classificação da qualidade da água de acordo com a metodologia recomendada pelo Laboratório de Salinidade dos EUA (USDA) (RICHARDS, 1954), resultou na identificação da ocorrência de três classes: C1, C2 e C3, mostrando que as

águas analisadas apresentam de baixo a alto perigo de salinização (Figura 36). Dos 126 reservatórios monitorados, 23 tiveram suas águas classificadas como C1; 85 como C2; e 18 como C3. Na figura 36 são também representadas as classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará, de acordo com a nomenclatura adotada no presente estudo. O risco baixo abrangeu 7,01% da área, perfazendo 10.432 km²; o risco moderado envolveu 81,73% da área, totalizando 121.635 km² e, por fim, o risco alto abrangeu 11,24%, totalizando 16.782 km².

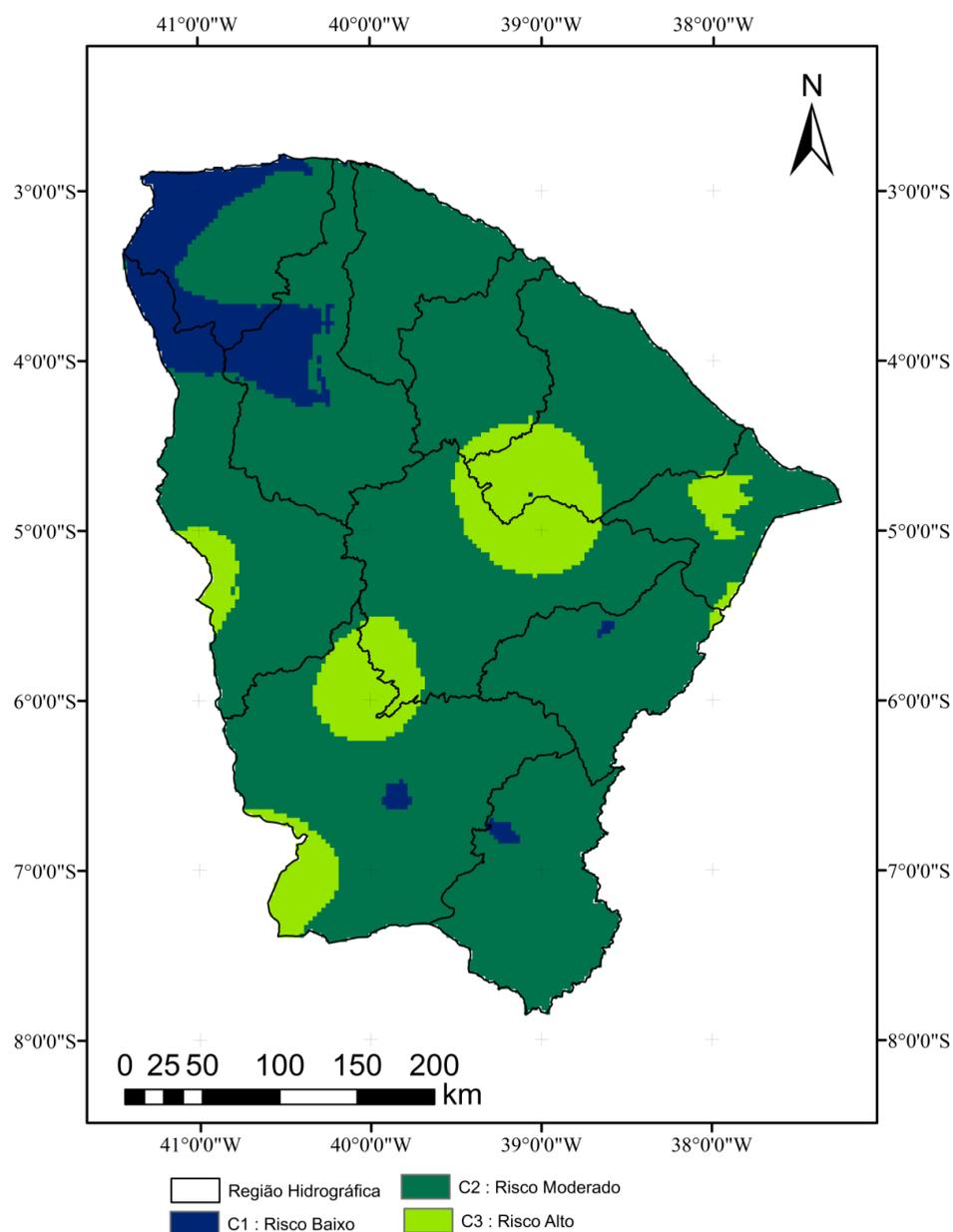


Figura 36- Distribuição espacial da qualidade das águas superficiais de acordo com Richards (1954) e seus respectivos riscos de salinização.

6.9. Uso do solo

A classificação não supervisionada do mosaico de imagens Landsat resultou em 30 classes que foram agrupadas em 6 conjuntos de cobertura do solo, conforme apresentado na Figura 37.

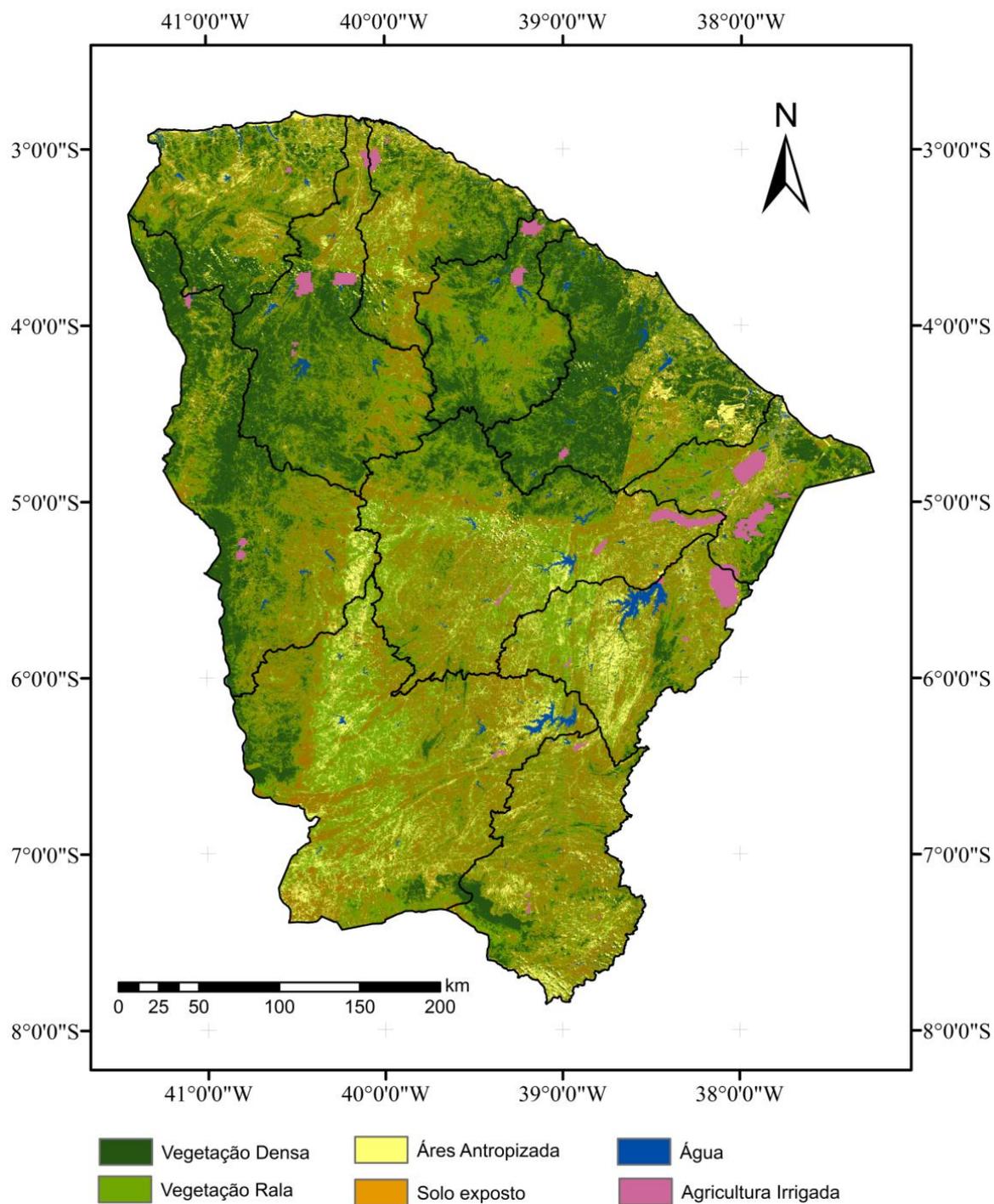


Figura 37 - Cobertura do solo do Estado do Ceará.

Como resultado final da classificação obteve-se que 1,57% do Estado do Ceará são ocupados por corpos d'água; 25,69% com mata nativa densa; 49,05% com mata nativa rala; 7,65% com áreas antropizadas, 1,09% com áreas agrícola inseridas em perímetros irrigados e 23,95% com solo descoberto. Na Tabela 25, além da distribuição percentual, é apresentada a distribuição absoluta de cada classe de uso e ocupação do solo no Estado do Ceará.

Tabela 25– Distribuição absoluta e percentual das classes de Uso e Ocupação dos Solos do Estado do Ceará

Uso e Ocupação	Área	
	(km ²)	(%)
Água	2340,08	1,57
Vegetação Densa	38233,40	25,69
Vegetação Rala	59604,81	40,05
Área Antropizada	11399,65	7,65
Agricultura	1622,20	1,09
Solo Exposto	35655,27	23,95

Para avaliar a acurácia da classificação do mosaico de imagens através do Índice Kappa, foi gerada a matriz de confusão apresentada na Tabela 26. A exatidão global foi de 68%, significando que este foi o percentual de elementos da imagem classificada que está de acordo com as amostras observadas nas imagens *Google Earth*.

Tabela 26 - Matriz de confusão para avaliação da classificação não supervisionada, método Isodata, do mosaico de imagens Landsat abrangendo o Estado do Ceará

	Verdade de Campo						Total de linhas
	Água	Vegetação Densa	Vegetação Rala	Área Antropizada	Agricultura	Solo Exposto	
Água	7	-	-	-	-	-	7
Vegetação Densa	1	25	3	9	-	-	38
Vegetação Rala	-	7	52	23	-	5	87
Área Antropizada	-	3	-	16	-	4	23
Agricultura	1	3	1	-	3	-	8
Solo Exposto	-	-	-	4	-	33	37
Total de colunas	9	38	56	52	3	42	200

A matriz de confusão resultou no coeficiente Kappa com valor igual a 0,619, o que, de acordo com Landis e Koch (1977) (Tabela 6), conceitua a classificação realizada como “muito boa”. Resultado semelhante (0,53) foi obtido por Leão (2010) ao utilizar o método Isodata na determinação automática de 20 classes de uma área de 72.645 km² referente a Bacia hidrográfica do rio Jaguaribe que abrange 48% do território cearense.

Dada a localização da área de estudo em uma região semiárida, caracterizada por duas estações bem distintas de chuva e de seca; é fundamental ressaltar que as datas das passagens do satélite para obtenção das cenas utilizadas na classificação variaram de julho a setembro quando já acabou o período chuvoso no Estado do Ceará, que normalmente se estende de fevereiro a maio (CEARÁ, 2000). Assim, no período da passagem do satélite a vegetação caatinga nativa já começou a perder a folhagem, e é esperado que em cenas obtidas anteriormente, no fim do período chuvoso, resultariam em maiores percentuais de vegetação densa e vegetação rala, e menores de solo descoberto e área antropizada.

Na Figura 38 é apresentado o mapa de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará quanto ao critério Uso e Ocupação do Solo e, na Tabela 27, a distribuição absoluta e percentual de cada classe de risco.

A classe de risco baixo envolve 9,7% da área do Estado e é representada pelos corpos hídricos e vegetação nativa adensada. Nas áreas onde a vegetação nativa é bem preservada a biomassa bem formada pode ser suficiente para a extração de quantidades consideráveis de sais do solo, os sistemas radiculares bem estabelecidos favorecem a infiltração da água das chuvas além de possibilitar a melhor estruturação do mesmo e de incrementar a atividade biológica por meio de microorganismos associados às plantas (FREIRE et.al., 2003). Esses fatores contribuem para a conservação do solo e consequentemente, dificultam os processos de degradação, como a salinização.

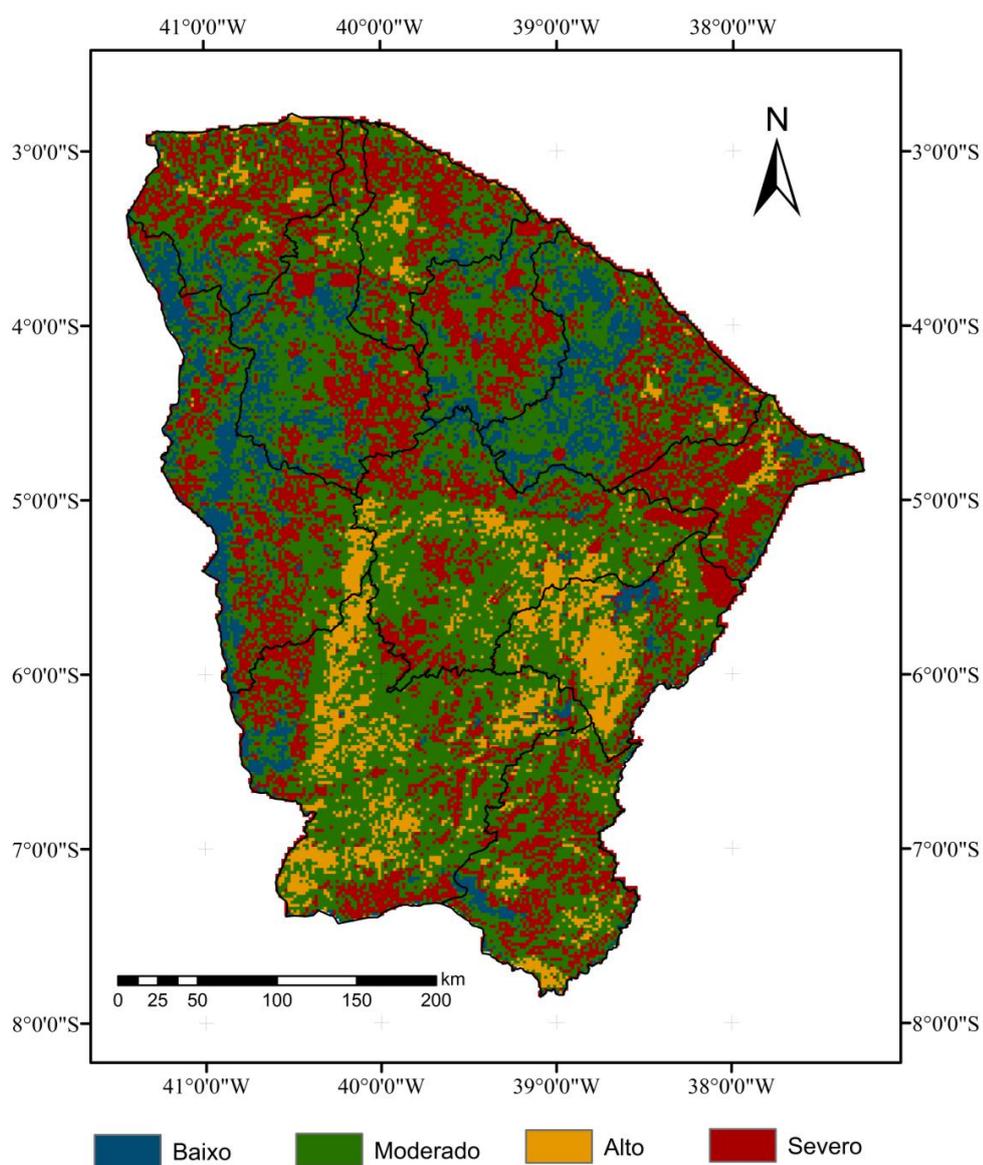


Figura 38– Risco de salinização dos solos do Estado do Ceará referente ao critério Uso e Ocupação do Solo.

Observou-se que a classe de risco moderado foi a mais abrangente, envolvendo 53,91% da área do Estado. Esta classe engloba a vegetação nativa rala, do tipo hipo e hiperxerófila, geralmente esparsa, caracterizada por folhas pequenas, que confere pouca cobertura do solo, deixando-o muitas vezes bastante exposto à radiação solar intensa o que eleva o potencial de evaporação e induz a ascensão por capilaridade da água contendo sais existentes no próprio terreno e a acumulação dos mesmos (HENSCHKE, 2007).

Tabela 27– Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará em função de seu Uso e Ocupação

Classificação do Risco	Nota de Risco de Salinização	Área	
		Valor Absoluto (km ²)	Valor Relativo (%)
Baixo	1	14.436,33	9,7
Moderado	2	80.225,90	53,91
Alto	3	13.295,78	8,93
Severo	4	40.867,99	27,46

A classe considerada de alto risco e abrangeu 8,93% da área total do Estado. Nesta classe estão inclusos os aglomerados urbanos, áreas agrícolas dispersas, áreas agrícolas em pousio, áreas para uso da pecuária. Esses usos são caracterizados pela remoção da vegetação de modo que o solo encontra-se parcial ou completamente exposto, além das alterações na drenagem natural devido à pavimentação, e possibilidade de ocorrência de vazamentos de águas residuais nas áreas urbanas ou circunvizinhas.

A classe de risco severo abrangeu 27,46% da área do Estado e engloba as áreas classificadas como solo descoberto e agricultura irrigada. As áreas de Solo Descoberto abrangem terras com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, e nelas o solo encontra-se parcial ou completamente exposto aos processos erosivos que podem expor subsolos salinos e à radiação solar direta que eleva o potencial de evaporação e induz a ascensão capilar da água resultando em depósitos de sal. As áreas de agricultura irrigada, correspondentes aos perímetros irrigados, são áreas onde existe a prática da irrigação e aplicação de fertilizantes, e assim, maior possibilidade de subida do nível freático devido à práticas de irrigação e/ou drenagem inadequada, ou aplicação de fertilizantes em excesso, sendo todas essas condições propícias ao processo de salinização.

6.10. Índice Risco de Salinização

6.10.1. Média aritmética simples

Na Figura 39 é apresentado o mapa de risco de salinização dos solos obtido com o cálculo da média aritmética simples.

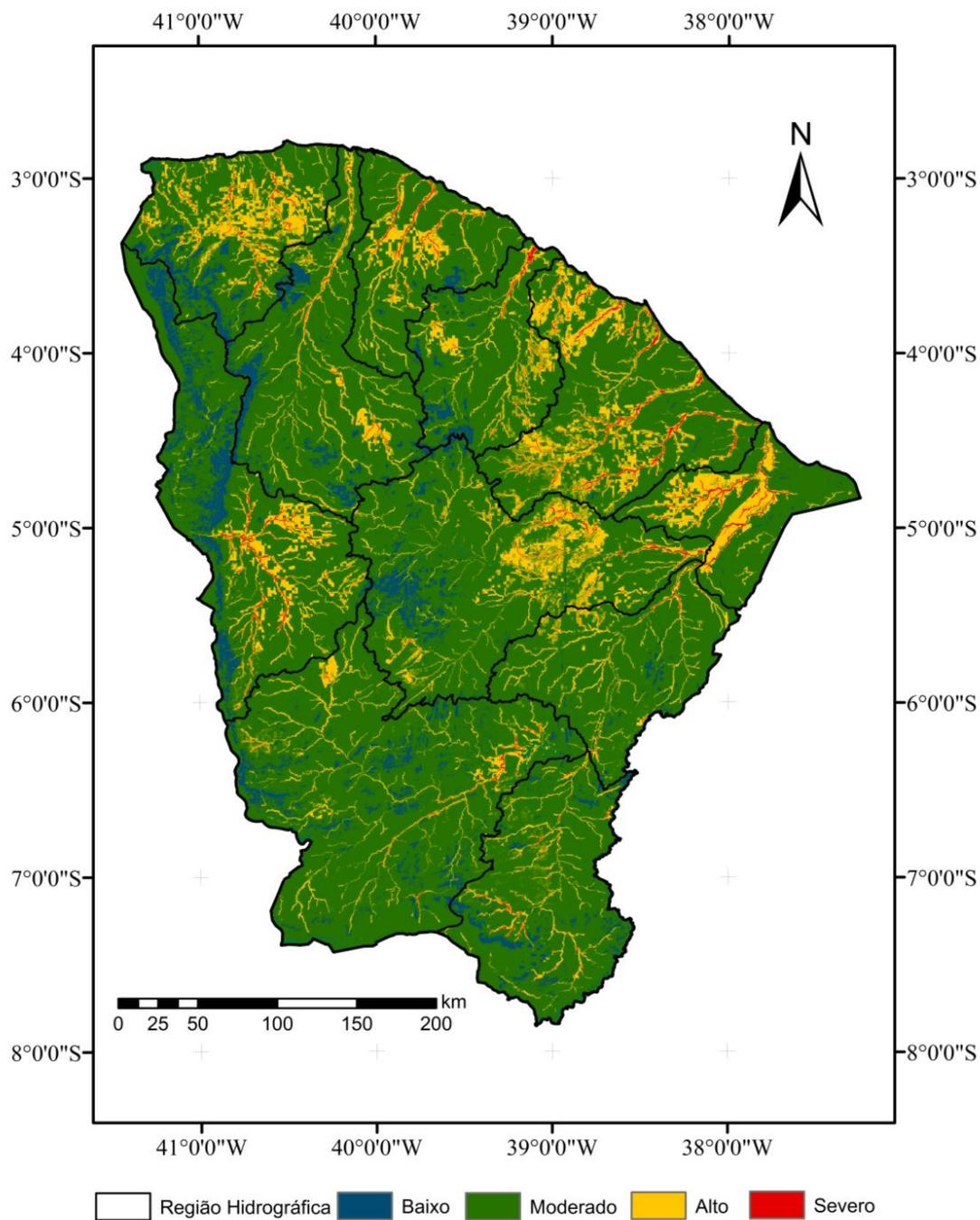


Figura 39– Mapa de Risco de Salinização dos Solos do Estado do Ceará segundo modelo aditivo.

Segundo este modelo, 11,897% da área do Estado está tembaixoriscode salinização dos solos enquanto 64,1% apresenta risco moderado; 19%, risco alto e 5,03% risco severo. Na Tabela 28 são apresentados os valores percentuais e absolutos ocupados por cada classe de risco.

A predominância do risco moderado é devida ao fato de que 4, dos 7 parâmetros considerados, apresentam maiores áreas incluídas nesta classe: segundo o parâmetro geologia, por exemplo, 63,58% da área do Estado está sob risco moderado; segundo a qualidade da água, 81,73% da área total; quanto aos solos, 49,22%; e quanto ao Uso e Ocupação, 53,91%.

A predominância do risco moderado seguido do risco alto corrobora com os resultados encontrados por Valladares e Faria (2004) ao analisarem o risco de salinização dos solos da Bacia do Rio Coruripe, Estado de Alagoas, no nordeste brasileiro. Os autores utilizaram a metodologia multicritério aditivo para integrar os mapas de solos, geomorfologia e geologia. Foram geradas então seis classes de risco, sendo que 30,5% da área corresponderam à classe de risco moderado, 36,8% alto, 22,5% risco baixo, 7,9% muito baixo de salinização, 0,4% risco muito alto e 0,3% altíssimo. Os autores consideraram a metodologia eficiente na geração do mapa de risco de salinização da Bacia do Rio Coruripe.

Tabela 28– Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará segundo modelo aditivo.

Classificação do Risco	Área	
	Valor Absoluto (km ²)	Valor Relativo (%)
Baixo	17.665,64	11,87
Moderado	95.397,46	64,10
Alto	28.276,94	19,00
Severo	7.485,94	5,03

Os valores pontuais de CEes correspondentes à verdade de campo (Figura 18) foram comparados ao mapa gerado pelo modelo e a matriz de confusão foi montada. A Tabela 29 expõe a matriz com as classes: baixo, moderado, alto e severo. Os números da diagonal principal quantificam os pixels classificados corretamente. Por exemplo, para a classe de risco moderado, dos 50 valores pontuais com CEes entre 1 e 2 dS m⁻¹ (considerados como representativos de risco moderado), 41 estavam em píxeis do mapa classificados como área de risco moderado. Já os números dispostos fora da diagonal

principal quantificam os valores discrepantes. Ainda para a classe de risco moderado, por exemplo, 7 valores de CEes estavam localizados em áreas que foram classificadas como de risco alto.

Tabela 29– Matriz de confusão para avaliação do mapa de Risco de Salinização dos Solos segundo Modelo Média Aritmética

		Verdade de Campo				Total da linhas
		Baixo	Moderado	Alto	Severo	
Risco Estimado	Baixo	25	16	7	2	50
	Moderado	2	41	7	0	50
	Alto	1	11	3	0	15
	Severo	0	12	6	4	22
	Total da Coluna	28	80	23	6	137

A Exatidão Global (EG) foi obtida aplicando os dados obtidos na matriz de confusão convenientemente na Equação 13. Desta forma, por este modelo, a quantidade de pixels classificados de acordo com os dados de CEes foi de 53,28%. Já o coeficiente de Kappa (K), obtido por meio da Equação 5, foi de 0,319, o que, de acordo com Landis e Koch (1977) (Tabela 7), conceitua a classificação realizada como “Razoável”.

A exatidão específica (EE) diz respeito ao número de elementos classificados corretamente em cada classe específica. Para o mapa produzido com a média aritmética, a EE da classe de risco baixo foi de 50%; da classe de risco moderado foi de 82%; da classe de risco alto, 20% e da classe de risco severo, de 18,1%.

6.10.2. Modelo definido por especialistas

Na Figura 40 é apresentado o mapa de risco de salinização dos solos segundo o modelo definido pelos oito especialistas em salinidade.

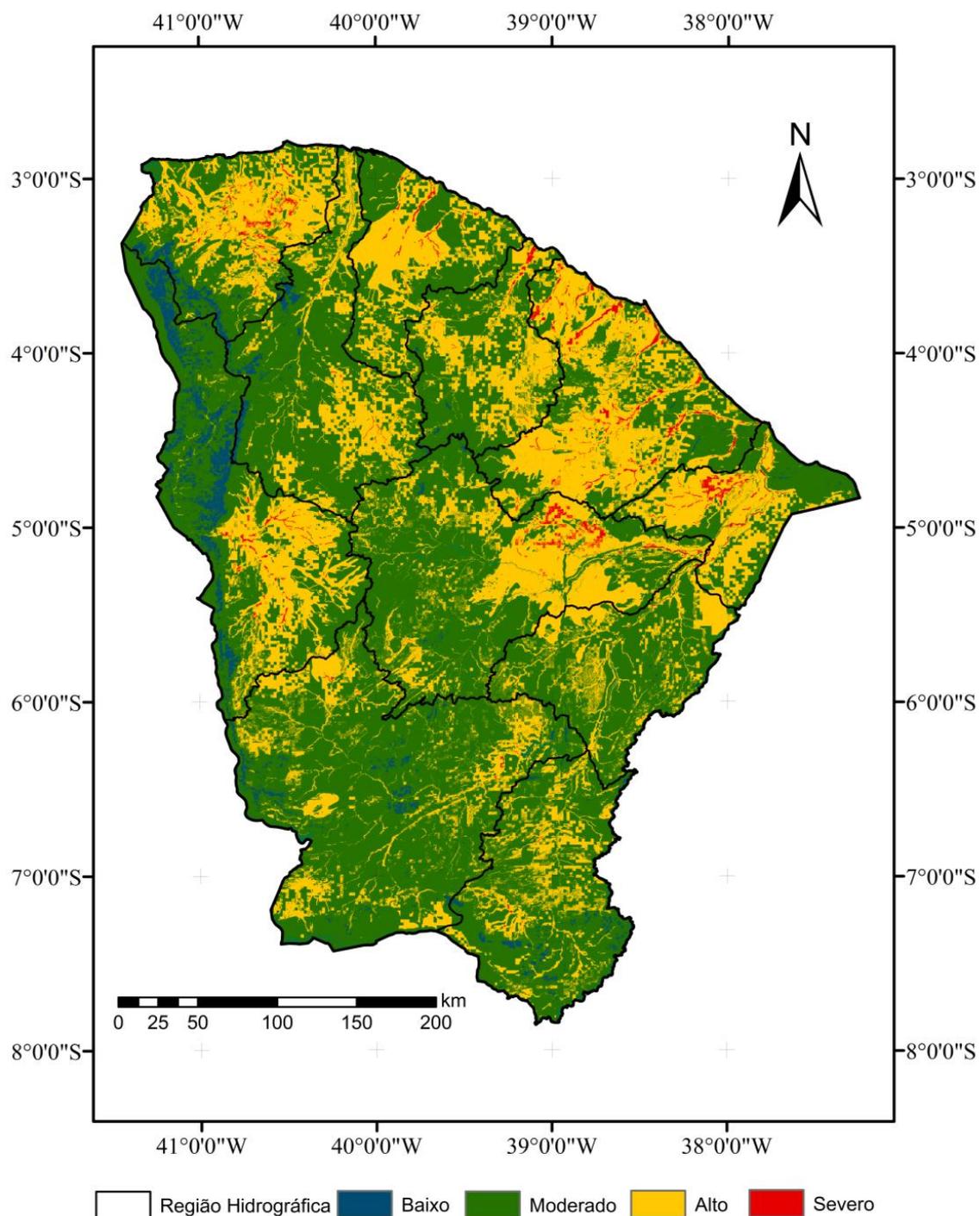


Figura 40 - Mapa de Risco de Salinização dos Solos do Estado do Ceará segundo modelo definido por Especialistas.

Segundo este modelo, 7,51% da área do Estado está sob baixorisco de salinização dos solos; 47,37 %, sob risco moderado; 39,54 %, sob alto risco, e 5,63% sob risco severo. Na Tabela 30 são apresentados os valores percentuais e absolutos ocupados por cada classe de risco.

Tabela 30 - Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará segundo modelo definido por Especialistas.

Classificação do Risco	Área	
	Valor Absoluto (km ²)	Valor Relativo (%)
Baixo	11176,83	7,51
Moderado	70498,87	47,37
Alto	58845,80	39,54
Severo	8378,90	5,63

De acordo com os pesos atribuídos a cada parâmetro (Ítem 5.4.2), os critérios Clima, Pedologia, Qualidade da Água e Uso e Ocupação do Solo são os principais responsáveis pelo resultado do mapa final do risco de salinização dos solos. Assim, como os maiores pesos foram atribuídos a esses parâmetros, a predominância da classe de risco moderado, segundo o modelo definido por especialistas, é diretamente atribuída às áreas ocupadas por esta classe nos mapeamentos do risco segundo estes parâmetros: 17,39 % da área, segundo parâmetro Clima; 49,22 %, segundo o parâmetro Pedologia; 81,73 % segundo ao parâmetro Qualidade de Água; e 53,91 % quanto ao parâmetro Uso e Ocupação.

Os resultados têm semelhança aos obtidos por Mota (2011), que também aplicou um modelo multicritério ordinal aditivo com o objetivo de mapear o risco de salinização dos solos da parte baixa da Bacia do Rio Acaraú, região norte do Estado do Ceará. Os pesos atribuídos aos parâmetros considerados foram definidos com base na experiência e por consenso de Pedólogos. Para o mapa de risco de salinização foram considerados os pesos de 20% para o tema pedologia, 20% para uso e cobertura das terras, 20% para declividade, 15% para geomorfologia, 15% para geologia e 10% para altimetria. O mapa de risco de salinização mostrou que 35,47 % da área total estão sob baixo risco de salinização seguida da classe de risco moderado, com 26,22%. A predominância do baixo risco de salinização é atribuída aos solos predominantes na área, que apresentam forte drenagem; seguida do uso e cobertura das terras que apresentaram ainda uma expressiva cobertura com vegetação arbóreo-arbustiva e vegetação mista.

Para avaliar o mapa de risco produzido, foi gerada a matriz de confusão apresentada na Tabela 31, cujos valores foram utilizados para o cálculo dos valores de exatidão global (EG), índice Kappa e Exatidão Específica (EE).

Tabela 31– Matriz de confusão para avaliação do mapa de Risco de Salinização dos Solos segundo Modelo definido por Especialistas.

		Verdade de Campo				Total da linha
		Baixo	Moderado	Alto	Severo	
Risco Estimado	Baixo	16	21	12	1	50
	Moderado	0	41	9	0	50
	Alto	0	4	11	0	15
	Severo	1	5	6	10	22
	Total da coluna	17	71	38	11	137

A matriz de confusão do modelo desenvolvido por especialistas em solos resultou numa EG de 56,93%. O índice Kappa apresentou valor de 0,403 o que, de acordo com Landis e Koch (1977), (Tabela 6), conceitua o mapa produzido pelo modelo também como “bom”.

A exatidão específica (EE) para o modelo desenvolvido segundo a opinião dos especialistas foi de 32% para o risco baixo; 82% para a classe de risco moderado; para a classe de risco alto, 73,3% e para o risco severo, 45%.

6.10.3. Emprego da Análise da Componente Principal

6.10.3.1 Análise de componentes principais

O teste de adequacidade aplicado ao modelo, Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), apresentou um índice igual a 0,51 considerado aceitável por Meyer e Braga (1999). Lopes (2008) aplicou o mesmo teste de adequacidade (KMO) no desenvolvimento de um índice de sustentabilidade para o perímetro irrigado Baixo Acaraú, empregando análise da componente principal e obteve KMO igual a 0,537.

A seleção do número de componentes, nesse estudo, teve como base os princípios descritos por Norusis (1990) e Hair Júnior (2005), ou seja, considerar somente aqueles que apresentem um autovalor superior a um. O modelo de melhor ajuste (maior KMO e maior explicabilidade da variância total por um menor número de fatores) foi aquele composto por quatro componentes, conforme pode ser observado na Tabela 32.

Tabela 32 - Matriz de cargas fatoriais das variáveis nas quatro componentes principais para o Estado do Ceará.

Variáveis	C1	C2	C3	C4
Clima	0,776	-0,139	-0,060	-0,108
Qualidade da água	0,714	-0,232	-0,024	0,138
Relevo	0,431	0,385	0,407	0,015
Pedologia	-0,05	0,212	0,767	-0,024
Uso e ocupação do solo	0,027	0,411	-0,073	0,863
Geologia	0,118	0,508	-0,525	-0,086
Malha hídrica	0,076	0,635	-0,058	-0,465
ΣP	2,089	1,782	0,433	0,333
Raiz característica (<i>Eigenvalues</i>)	1,323	1,098	1,045	1,001
Variância (%)	18,902	15,695	14,930	14,302
Variância acumulada (%)	18,902	34,597	49,528	63,830

Na Tabela 32 podem ser observados os valores das cargas fatoriais para as componentes um, dois, três e quatro (C1; C2, C3 e C4). Esses componentes expressam a relação entre fatores e variáveis e permitem a identificação das variáveis com maiores inter-relações em cada componente. Os valores elevados dos pesos fatoriais sugerem quais são as variáveis mais significativas em cada fator.

Verifica-se que os quatro primeiros componentes explicaram respectivamente 18,9; 15,69; 14,93 e 14,3% da variância total dos dados, concentrando em quatro dimensões 63,83% das informações antes dissolvidas em sete dimensões (Tabela 32). Resultados semelhantes foram encontrados por Carneiro Neto (2005) desenvolvendo um índice de sustentabilidade para o Perímetro Irrigado Araras Norte, onde encontrou um modelo formado por cinco componentes, explicando 67,27% da variância total.

Os valores dos pesos(π) de cada variável, apresentados na Tabela 33, foram calculados usando a Equação 12 em função da raiz característica (Tabela 32) de cada componente, associado a explicabilidade de cada variável em relação às componentes principais extraídas.

Tabela 33– Pesos (π_i) a serem associados aos indicadores de salinização

Variáveis	Pesos (π_i)
Relevo	26,068
Uso e ocupação do solo	23,165
Pedologia	17,048
Qualidade da água	14,596
Clima	12,745
Malha hídrica	4,936
Geologia	1,439
Total	100

Os maiores coeficientes do índice do risco de salinização (Tabela 33), segundo a análise da componente principal, estão associados às variáveis relevo, uso e ocupação do solo e pedologia.

6.10.3.2. Risco de salinização dos solos por ACP

Para a elaboração do mapa do risco de salinização dos solos do Estado do Ceará segundo o modelo elaborado pela ACP (Figura 41), utilizou-se a Equação 11, usando os mapas dos parâmetros (geologia, relevo, pedologia, clima, malha hídrica, uso e ocupação do solo e qualidade da água) e os pesos atribuídos a cada um deles (Tabela 33).

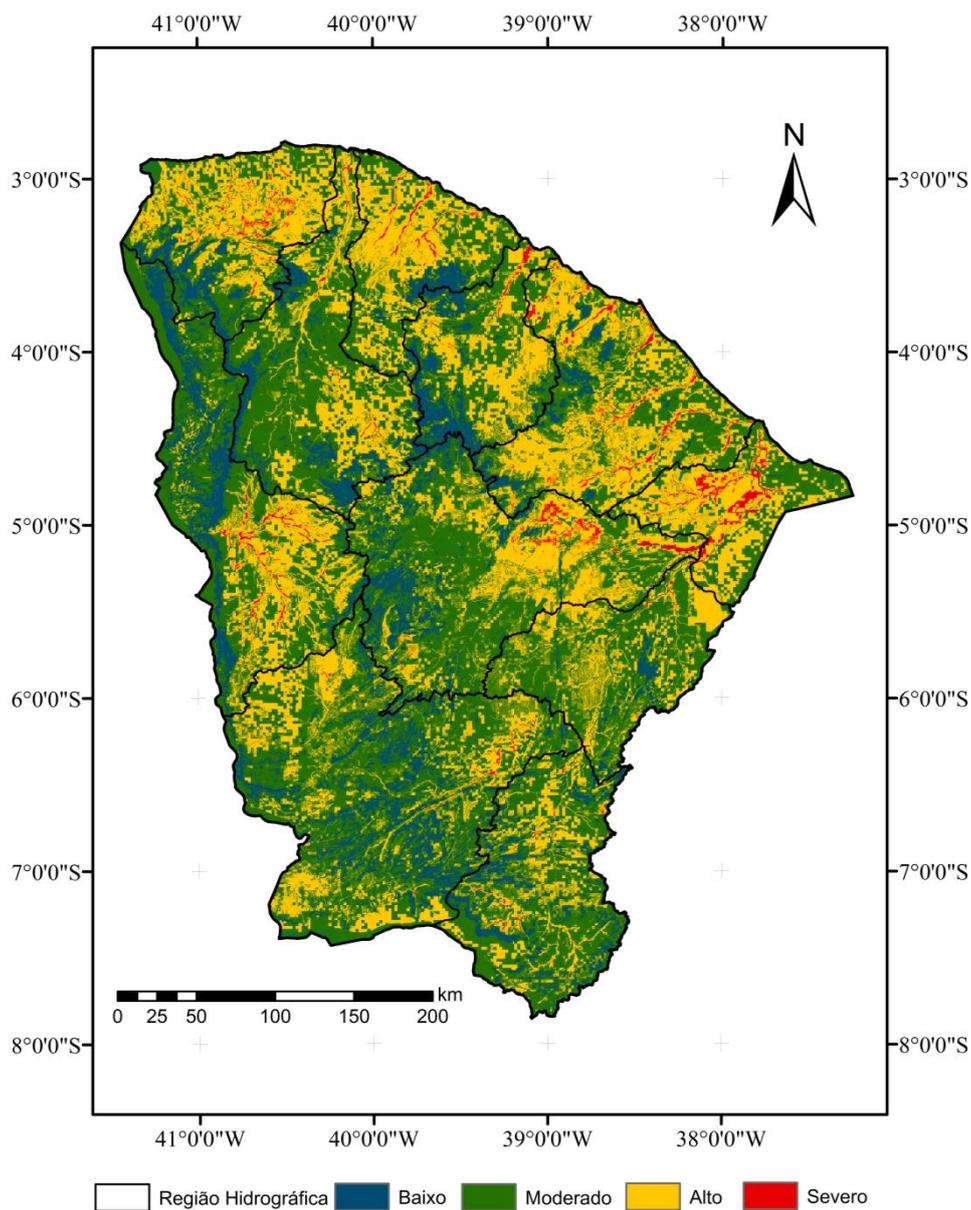


Figura 41 - Mapa de Risco de Salinização dos Solos do Estado do Ceará segundo modelo elaborado pela Análise da Componente Principal.

Segundo este modelo, a classe de risco baixo abrangeu 15,46% da área; a classe de risco moderado foi predominante abrangendo 42,13% da área, as classes de risco alto e severo abrangeram respectivamente 34,23% e 8,18% da área de estudo (Tabela 34).

Tabela 34 - Distribuição absoluta e percentual das classes de risco de salinização dos solos do Estado do Ceará segundo modelo elaborado pela ACP.

Classificação do Risco	Área	
	Valor Absoluto (km ²)	Valor Relativo (%)
Baixo	23008,4996	15,46
Moderado	62700,3938	42,13
Alto	50943,1398	34,23
Severo	12173,9668	8,18

De acordo com Bonetti (2011), na ACP as variáveis mais importantes são as de maiores coeficientes, negativos ou positivos. Assim, relevo, pedologia e uso e são as principais variáveis a influenciarem o resultado obtido com o mapeamento pela ACP.

As áreas classificadas como baixo risco na Figura 41, que abrangeram 15,46% da área, correspondem às áreas de maiores valores percentuais de declividade e conseqüentemente sob menor risco, facilmente observadas na Figura 22, como a região do maciço de Baturité no noroeste do Estado; ao passo que a uniformidade do alto risco observado ao longo da linha costeira, obtido apenas com a aplicação do modelo elaborado segundo a ACP, também mostra a influência direta do relevo nesta área que apresenta as menores declividades (Figura 22).

A influência da pedologia é bem observada nas áreas classificadas como de risco severo de salinização: essas áreas coincidem com incidência de associações de solos de drenagem classificadas como ruim, muito ruim e imperfeitas (Figura 24), como por exemplo, a predominância de PLANOSSOLOS HÁPLICOS no município de Quixadá e de GLEISSOLOS no município de Aracati.

Já a influência dos usos dos solos pode ser bem observada tanto nas áreas classificadas como de baixo risco quanto em áreas sob risco severo. Como pode ser observado na Figura 35, a região do Maciço de Baturité, no noroeste do Estado, e da Serra da Ibiapaba, a Oeste, são exemplos de áreas com vegetação nativa ainda preservada e que corresponderam aos menores riscos de salinização segundo o modelo desenvolvido pela ACP.

Figueirêdo (2005) destacou a importância de que, no estudo de risco de salinização, a influência dos pesquisadores na determinação dos pesos de cada critério fosse mínima, uma vez que o tomador de decisão, mesmo que esteja motivado pela necessidade de prever ou controlar, geralmente enfrenta um complexo sistema de

componentes correlacionados, e quanto melhor o sistema for entendido, melhor será a sua previsão ou decisão (SAATY, 1991). Daí a relevância da utilização da ACP, já que a técnica baseia-se no princípio de que para a tomada de decisão, os dados utilizados são pelo menos tão valiosos quanto a experiência e o conhecimento dos pesquisadores.

Para avaliar o mapa de risco produzido através da Exatidão global (EG), Índice Kappa e Exatidão Específica (EE), foi gerada a matriz de confusão apresentada na Tabela 35.

Tabela 35– Matriz de confusão para avaliação do mapa de Risco de Salinização dos Solos segundo a ACP

		Verdade de Campo				Total da linha
		Baixo	Moderado	Alto	Severo	
Risco Estimado	Baixo	31	10	8	1	50
	Moderado	1	34	15	0	50
	Alto	3	3	9	0	15
	Severo	1	4	7	10	22
	Total da coluna	36	51	39	11	137

A partir da matriz de confusão obteve-se o valor da EG de 61,31%, a melhor exatidão global entre os três métodos. No entanto, o índice Kappa obtido, de valor 0,465, também classifica, de acordo com Landis e Koch (1977) (Tabela 6), o mapeamento como “Bom”.

Já os valores de EE foram de 62% para a classe de risco baixo; 68% para classe de risco moderado; 60% para risco alto; e 45,4% para o risco severo.

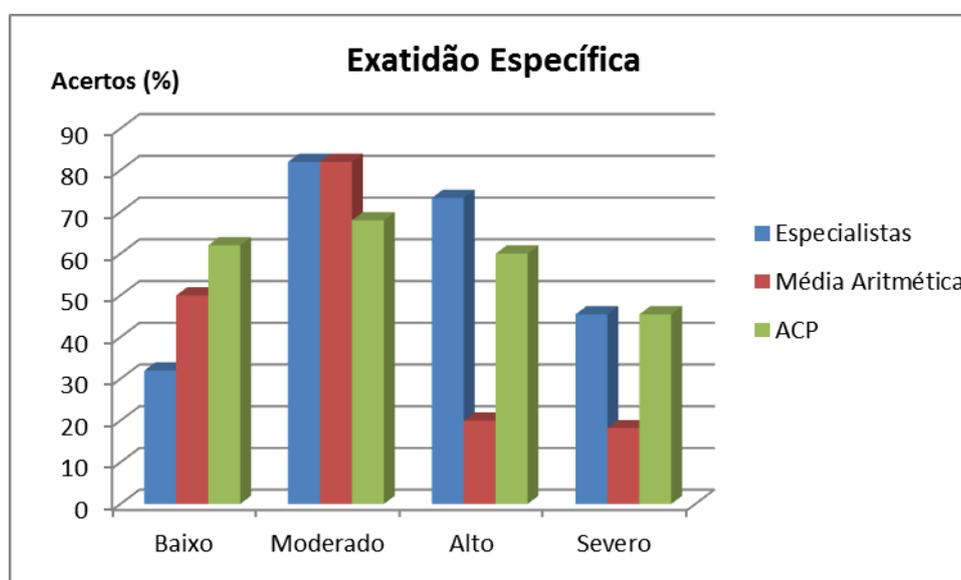
6.10.4. Comparação entre os modelos para o índice de Risco de Salinização

Na Tabela 36 são apresentados os índices de Exatidão Global (EG) e o índice Kappa com sua classificação, de acordo com Landis e Koch (1977), para os três modelos aplicados.

Tabela 36– Exatidão Global (EG) e Qualidade do mapa segundo índice Kappa

Modelo	EG	Kappa	Qualidade
Média Aritmética	53,28	0,319	Razoável
Desenvolvido por Especialistas	56,93	0,403	Boa
Elaborado segundo ACP	61,31	0,465	Boa

Na Figura 42 é apresentada a comparação do desempenho, quanto à Exatidão Específica, dos três modelos aplicados na elaboração dos mapas de Risco de Salinização dos solos.

**Figura 42**– Exatidão Específica para as classes de risco segundo os modelos aplicados.

A análise da Figura 42 permite inferir que os três modelos aplicados apresentaram desempenho semelhante ao classificar o risco moderado de salinização dos solos. A classe de risco baixo apresentou melhor acurácia, de 62%, quando classificada pelo modelo elaborado segundo a ACP, já a classe de risco alto apresentou melhor acurácia quando classificada pelo modelo definido segundo a opinião dos especialistas em salinidade. As classes de risco moderado e severo apresentaram sensibilidade similar quando determinada pela ACP e especialistas.

Esses valores, no entanto, são influenciados pelo número de amostras consideradas como verdade de campo: os valores pontuais de CEes não apresentaram

uma distribuição uniforme entre as classes de risco, o que implica numa tendência de que as classes cujas áreas foram mais representativas em cada modelo apresentem melhor exatidão específica. Para diminuir essa influência, seria necessário a utilização de um número igual de amostras de CEEs para cada classe de risco.

Considerando os valores numéricos do índice Kappa e a EG, conclui-se que a ACP foi o modelo que melhor estimou os riscos, no entanto, é fundamental ressaltar que o critério de atribuição de pesos e classes nos mapas base podem ser alterados em qualquer momento do estudo, dependendo do julgamento de cada pesquisador, dos parâmetros considerados e do enfoque que se pretende dar ao estudo. Porém, após qualquer alteração nos julgamentos, o processo da técnica ACP deverá ser executado novamente, pois com isto, serão obtidos novos pesos para cada um dos critérios; e posteriormente deverá ser realizada uma nova reclassificação, para que com isto o mapa final seja atualizado a cada modificação.

Outra questão que deve ser frisada é de que os mapas de risco representam o potencial de que as áreas em questão venham a ser lesadas pelo processo de salinização, e não são, necessariamente, indicativos de áreas já salinizadas. Esses mapeamentos são realizados com o objetivo principal de identificar áreas mais vulneráveis que merecem manejo e/ou gestão criteriosa de modo que se possa evitar que o perigo eminente seja expresso.

É importante também, ressaltar a importância de produção e acessibilidade às informações sobre a variabilidade do solo para estudos relativos à modelagem ecológica, a previsão ambiental, agricultura de precisão, e gestão de recursos naturais. Consequentemente, o estudo sobre a variabilidade do risco de salinização do solo pode fornecer dados importantes para a gestão dos recursos naturais, restauração de áreas afetadas e, sobretudo, prevenção.

A metodologia de análise do presente estudo mostrou-se, além de eficaz, aplicável a conjuntos de dados futuros ou em outras áreas, em diferentes escalas.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A utilização das técnicas de Geoprocessamento na integração e manipulação de dados ambientais georreferenciados possibilitou que a área de estudo fosse caracterizada em detalhes por meio do mapeamento de sua altitude, declividade, relevo, pedologia, distribuição espacial da precipitação pluviométrica, evapotranspiração potencial e condutividade elétrica da água, além do índice de aridez e usos e ocupação dos solos.

O método interpolador krigagem apresentou um bom desempenho na espacialização da precipitação pluviométrica que foi melhor estimada com o ajuste do semivariograma pelo modelo esférico. Já para a espacialização da qualidade das águas, representada pela condutividade elétrica, o modelo gaussiano apresentou o melhor desempenho de ajuste para realização da krigagem.

O mapeamento dos riscos de salinização dos solos segundo cada parâmetro considerado mostrou que existe predominância do risco moderado na maior parte da área em estudo.

Segundo a avaliação dos riscos pela ACP, as variáveis determinantes da susceptibilidade à salinização são, em ordem decrescente: relevo, uso e ocupação do solo, pedologia, qualidade da água, clima, malha hídrica e geologia.

O modelo média aritmética simples foi o menos preciso na estimativa do risco. O modelo elaborado por especialistas em pedologia apresentou melhor acurácia na determinação do risco alto. O modelo desenvolvido pela ACP apresentou melhor Exatidão Global e melhor índice Kappa. Segundo este modelo, a classe de risco predominante foi a de risco moderado que abrangeu 42,13% da área, seguida do risco alto e baixo que abrangeram respectivamente 34,23% e 15,46% da área de estudo.

Os mapas de risco de salinização de solos gerados para o Estado do Ceará podem ser utilizados como material auxiliar para a elaboração de zoneamentos, como também para o planejamento agroambiental e gestão em escala regional, indicando a necessidade de utilização adequada dos solos de modo a contribuir com a conservação e a sustentabilidade dos sistemas de produção.

Com intuito de se obter melhor acurácia nos resultados de análise de risco de salinização de solos, recomenda-se que o estudo seja desenvolvido em escalas maiores, ou seja, o levantamento de dados em áreas menores, por ser de mais fácil acesso, possibilitará melhor detalhamento na diferenciação de classes, tanto nos mapas base como nos mapas finais. A utilização de bancos de dados uniformes, tanto espacial

quanto temporalmente, também é imprescindível para se garantir a qualidade dos resultados.

8 REFERÊNCIAS

ABDELFATTAH, M. A., SHAHID, S.A., O, Y.R. **Soil Salinity Mapping Model Developed Using RS and GIS – A Case Study from Abu Dhabi, United Arab Emirates.** 2009

ABROL, I.P., YADAV, J.S.P., AND MASSOUD, F.I. 1988. Salt Affected Soils and their Management. **FAO Soils Bulletin 39**, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome., Italy. Disponível em <http://www.fao.org/docrep/x5871e/x5871e00.htm#Contents>. Acesso em 16 de outubro de 2010.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998, 297p. **FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56**

ALMEIDA, L.Q. & PASCOALINO, A. **Gestão de risco, desenvolvimento e (meio) ambiente no Brasil** - Um estudo de caso sobre os desastres naturais de Santa Catarina. UNESP (2009)

AL-MULLA, Y. A. Salinity Mapping in Oman using Remote Sensing Tools: Status and Trends. **Management of Salt-Affected Soils and Water for Sustainable Agriculture**, p.17-24. Sultan Qaboos University. 2010.

ANDRADE, E. M.; LOPES, F. B.; PALÁCIO, H. A. Q.; AQUINO, D. N.; ALEXANDRE, D. M. B. Land use and groundwater quality: The case of Baixo Acaraú Irrigated Perimeter, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, p. 208-215, 2010.

ANDRADE, E. M. et al. Fatores determinantes da qualidade das águas superficiais na bacia do Alto Acaraú, Ceará, Brasil. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.6, p.1791;1797, 2007

ANTOINE, J-M. et al. **Les mots des risques naturels**. Toulouse (FR): Presses Universitaires du Mirail, 2008. Disponível em <http://books.google.com.br/>. Acesso em 2 de fevereiro de 2011.

ARAÚJO, F. S., MARTINS, F. R., SHEPHERD, G. J. Variações estruturais e florísticas do carrasco no Planalto da Ibiapaba, Estado do Ceará. **Rev. Brasil. Biol.**, 59 (4): 663-678. 1998.

ASMAR, F. Desertification Prone Areas. ACSAD – MOA – NCRS. CoDeL **Combating the desertification in Lebanon – v. 1, Issue 2.** 2001

ATKINSON PM, LLOYD, C.D. Mapping precipitation in Switzerland with ordinary and indicator Kriging. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 2. 2002.

AUSTRALIAN NATIONAL LAND AND WATER RESOURCES AUDIT. **Australian dryland salinity assessment 2000**: extent, impacts, processes, monitoring and management options. Australian National Land and Water Resources Audit, Canberra, Australia, 2000. Disponível em:

http://www.anra.gov.au/topics/water/pubs/national/water_contents.html. Acesso em 03 de março de 2011

AYERS, R.S.; WESTCOT, D.W. A qualidade da água na agricultura. **Estudos FAO. Irrigação e Drenagem 29** (Revisado). Campina Grande – PB UFPB. Tradução: GHEYI, H.R.; MEDEIROS, J.F.; DAMASCENO, F.A.V. 1991, 218 p.

BANDEIRA, A. P. N. Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas com ocupações desordenadas no Município de Camaragibe - PE. Centro de tecnologia e geociências (**Tese de doutorado**), Recife – PE, 2003 .

BONETTI, C.. **Estatística aplicada a análise ambiental**. Análise de Componentes principais. Universidade Federal de Santa Catarina (2011),

BRASIL - **Ministério da Integração Nacional e do Meio Ambiente**. Nova delimitação do semiárido brasileiro, Brasília, DF: MI, 2005. Disponível em <http://www.mi.gov.br/desenvolvimentoregional/publicacoes/delimitacao.asp>. Acesso 15 de junho de 2011.

BRESSAN, M.C.; BERAQUET, N.J.; LEMOS, A.L. da S.C. Características de qualidade de carne em peixe de frango utilizando a análise de componente principal. **Boletim da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, n.35, 2001.

BUI, E. **Assessing the regional risk of salinization over the Dalrymple Shire**. CSIRO Land and Water Care Program on Salinity Control. Technical Report 26. 1997. 27p.

BURINGH, P. **Food production potential of the world**. In: Radhe Sinha (ed.). The World Food Problem; Consensus and Conflict. Pergamon Press. pp. 477-485. 1979.

BURROUGH, P. A McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.58, p.1501-11, 1994.

CARNEIRONETO, J.A. Indicadores de sustentabilidade ambiental para os perímetros irrigados Ayres de Sousa e Araras. **Dissertação** (Mestrado em Irrigação e Drenagem); 119p. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

- CARUSO, C. e QUARTA F. Interpolation Methods Comparison. **Computers Mathematical Application**. v. 35, p. 109-126, 1998.
- CARVALHO, J. R. P.; ASSAD, E. D. Análise espacial da precipitação pluviométrica no estado de São Paulo: comparação de métodos de interpolação. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 377-384, 2005.
- CASTANHEIRA, N.L.A.S. Previsão da salinização e sodicização em solos regados com águas salinas com uso de indicadores de qualidade do solo. 2010. 174p. **Dissertação** (Mestrado em Gestão e Conservação de Recursos Naturais). Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa.
- CASTRO, F. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.14, n.8, p.871–880, 2010.
- CAVALCANTE, L. F. Sais e seus problemas nos solos irrigados. **Dissertação**. Areia: CCA-UFPB. 2000. 72p
- CEARÁ, Governo do Estado do Ceará. **Diagnóstico e Macrozoneamento Ambiental do Estado do Ceará**: Diagnóstico Geoambiental. v.1. Fortaleza: Convênio FCPC/Semace, 2005.
- CENTENO, J. A. S. **Sensoriamento Remoto e Processamento de Imagens Digitais**. Curitiba: Departamento de Geomática, Universidade Federal do Paraná – PR, 2003. 210 p.
- COGERH. Companhia de Gerenciamento dos Recursos Hídricos. **Estudos Hidrológicos**. Disponível em <http://portal.cogerh.com.br/eixos-de-atuacao/estudos-e-projetos/estudos-hidrologicos>. Acesso em 15 de abril de 2011.
- COLOMBO, R.; VOGT, J. V.; SOILLE, P.; PARACCHINI, M. L.; JAGER, A. **Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data**. *Catena*, n. 70, p. 296 – 305, 2007.
- CONGALTON, R.G. A review of assessing the accuracy of classification of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, v.37, n.1, p.35-46, 1991.
- CONGALTON, R.G., GREEN, K. A practical look at sources of confusion in error matrix generation. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.59, n.5, p.641-644, 1993.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - **Resolução Conama nº 238**. CONAMA, 1997.

- CORDEIRO, G.G & MANSEFU, A.R. 2001. Degradação de terras por salinidade no Nordeste do Brasil e medição instrumental da salinidade. Petrolina, PE. Embrapa Semiárido. **Documentos Embrapa**, 175. 31p. 2001.
- CORDEIRO, G.G. **Salinidade em agricultura irrigada: conceitos básicos e práticos**. Petrolina, PE. Embrapa Semiárido, Série Documentos 180. 40p. 2001.
- CORDEIRO, G.G.;BARRETO, A.N.;GARRI, A.C.R.C. **Levantamento das condições de salinidade e sodicidade do projeto de irrigação de São Gonçalo (2a parte)**. Petrolina: EMBRAPA/CPATSA, 1988. 57p. Disponível em: <http://www.cpatosa.embrapa.br/artigos/salinidade.html>. Acesso em 10 de junho de 2010.
- CORRAR, L.J. et al. **Análise multivariada para os cursos de administração, ciências contábeis e economia**. São Paulo: Atlas, 2007. 542p.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; AZEVEDO, L. G.; DUARTE, V.; HERNANDEZ, FLORENZANO,T. **Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico**. São José dos Campos: INPE, 1996.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE OBRAS CONTRA AS SECAS - DNOCS. **Grupos de Coordenação Executiva das Operações Agrícolas (GOA)**. Situação em 30/04/1991. Fortaleza, 1991.
- DIAS, N.S. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade em solo cultivado com melão rendilhado sob ambiente protegido. **Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem)**. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba-SP. 2004.131p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Serviço de Produção de informação, 2006. 306p
- EVANS, F.H., CACCETTA, P. A Salinity risk prediction using Landsat tm and DEM derived data. **CSIRO Mathematical and Information Sciences Report**. 2000.
- EVANS, F.H., CACCETTA, P. A., FERDOWSIAN, R., Kiiveri, H.T., Campbell, N. A. **Predicting Salinity in the Upper Kent River Catchment**. "Integrating Remotely Sensed Data With Other Spatial Data Sets to Predict Areas at Risk from Salinity", 1995. Disponível em http://www.cmis.csiro.au/rsm/research/predsal/kent_final_report.html , acesso em 10 de junho de 2010.
- EVERITT, B. S. **Cluster analysis**. 3rd ed. London: Heinemann Educational Books, 1993. 122p.
- EVERITT, B.S.; DUNN, G. **Applied multivariate analysis**. London: Edward Arnold, 1991. 400p.
- FABRES, T.M.. Classificação climática segundo Koppen e Thornthwaite e caracterização edafoclimática referente a região de Santa Maria, RS. **Dissertação (Mestrado)** – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2009. 127 p.

FAO, 2000a. Land and Plant Nutrition Management Service, ProSoil-**Problem Soil Database**. Homepage: <http://www.fao.org/ag/AGL/agll/prosoil/salt.htm>, acesso em 01 de setembro de 2010.

FAO, 2000b. Extent and causes of salt-affected soils in participating countries. **Global Network on Integrated Soil Management for Sustainable Use of Salt-Affected Soils**. FAO-AGL website. <<http://www.fao.org/ag/agl/default.html>> Acesso em 27 de fevereiro de 2011.

FARIFTEH, J.; A. FARSHAD; RJ GEORGE, Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics. **Geoderma**, 2006. 130 (3-4): p. 191-206.

FELICIANO, W.C. Análise de Riscos como Ferramenta de Gestão Ambiental. **CRQ IV Set/2008**. 14 p. 2008.

FIGUEIRÊDO, A.F.R. Análise do risco de salinização dos solos da bacia hidrográfica do rio colônia-Sul da Bahia. **Dissertação** (Mestrado). Programa Regional de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente. Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, Bahia, 2005.

FLORINSKY, I.V.; EILERS, R.G.; MANNING, G. & FULLER, L.G. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. **Environ. Modeling Software**, 17:295-311, 2003.

FREIRE, M. B. G. S. et al. Estimativa do risco de sodificação de solos de Pernambuco pelo uso de águas salinas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.2, p.227-232, 2003

FREITAS, S.S., PARADA, A.D.S. **Microbiota do solo e qualidade ambiental**. Instituto Agrônomo de Campinas. 317p. 2010.

GHASSEMI, F., JAKEMAN, A.J., AND NIX, H.A. **Salinisation of Land and Water Resources: Human Causes, Extent, Management and Case Studies**. The Australian National University, Canberra, Australia, and CAB International, Wallingford, Oxon, UK. 1995

GOES, E. S. O. O problema da salinidade e drenagem em projetos de irrigação do Nordeste e ação de pesquisa, com vistas ao seu equacionamento. In: **Reunião Sobre Salinidade em Áreas Irrigadas**. Fortaleza, Anais...: SUDENE/DNOCS. 1978, p.1-34

GOMES, A. G. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solo em região semiárida utilizando sensoriamento remoto e geoprocessamento – área piloto de Parnamirim (PE). 2005. 165 f. **Dissertação** (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2005.

GOMES, D.D.M., MEDEIROS, C.N., ALBUQUERQUE, E.L., **Análise têmporo-espacial das ocorrências de focos de calor no Estado do Ceará**: configuração dos

cenários no contexto das unidades fitogeográficas e das macrorregiões de planejamento. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE. 2010

GREINER, R., Optimal farm management responses to emerging soil salinization in a dryland catchment in eastern Australia. **Land Degradation & Development**. 8(4): p. 281-303. 1997.

HA, W., PRASANNA H., OOMMEN, T, MAREK, T.H., PORTER, D.O, HOWEL, T.A., Spatial Interpolation of Daily Reference Evapotranspiration in the Texas High Plains. **World Environmental and Water Resources Congress 2011**: p.2796-2894. 2011.

HAIR JR., J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. São Paulo: Bookman, 2005.

HARUM, T., SACCON, P. CALASANS, N. **Water resources, vulnerability assessment and quality of water in Cachoeira catchment**. In Newsletter ECOMAN , Number 3 – Decision support system for sustainable Ecosystem Management in Atlantic rain forest rural areas. (2004)

HASSAN, I. M..Desertification Monitoring Using Remote Sensing Technology.**International Conference on Water Resources & Arid Environment**. 2004. 15p.

HASSOUN, S. A. Remote Sensing of Soil Salinity in Arid Areas in Saudi Arabia. **International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS**.V.10. N.2.2010.

HENSCHKE, C..Impact of perennial vegetation on watertables and dryland salinity.**Australian Journal of Soil Research**.V.40(1). P. 93 – 113. 2007

HOLANDA, J. S. de. **Manejo e utilização de áreas salinizadas do Vale do Açu**. Fortaleza: Banco do Nordeste, 2000. 95p.

IANNETTA, M. & COLONNA, N.. Salinização. Projeto LUCINDA (**Land Care in Desertification Affected Areas: from Sciences Towards Application**) Processos de Desertificação, Série B. Fascículo B3. 12 p. 2006

INESP, Instituto de Pesquisas para o Desenvolvimento do Estado do Ceara. **Cenário atual dos recursos hídricos do Ceará**. 88p. Fortaleza, CE. 2009.

IPECE, 2007. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Ceará em Mapas**. Disponível em <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12.htm>; acesso em 16 de outubro de 2011.

IPECE, 2010. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. **Ceará em Números 2010: Caracterização Territorial**. 202p.

IPLANCE. **Atlas do Ceará**. Fortaleza, 1995. 64 p.

IWAI, O. K. Mapeamento do uso do solo urbano no município de São Bernardo do Campo, através de imagens de satélites. 2003. 127 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/td-03022004-152010/>>. Acesso em: 2 de abril de 2011.

JACOMINE, P.K.T.; ALMEIDA, J.C.; MEDEIROS, L.A.R. **Levantamento exploratório: reconhecimento de solos do Estado do Ceará**. Recife: EMBRAPA, DPP, SUDENE. 1973. 2v. 830 p. (Boletim Técnico, 28, Série Pedológica, 16).

JANKOWSKI, P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 9, n. 3, p. 251–273. 1995.

JOHAN, J.A. Variabilidade espacial dos atributos do solo e da produtividade em uma área pilotp com e sem manejo localizado da agricultura de precisão. **Dissertação**. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Universidade Federal do Paraná. Cascavel, 2001. 89p.

JOHNSON, R. A.; WICHERN.D.W. **Applied multivariate statistical analysis**. Englewood Clifs: Prentice-Hall, 1988. 607p.

JORENUSH, MH AND AR SEPASKHAH, Modelling capillary rise and soil salinity for shallow saline water table under irrigated and non-irrigated conditions. **Agricultural water management: an international journal**. Vol. 61, No. 2 (2003), p. 125-142. 2003.

KASTELEC, D, KOŠMELJ, K. Spatial Interpolation of Mean Yearly Precipitation using Universal Kriging. ANDREJ, M., ANUŠKA, F.(Editores) Metodološki zvezki, 17, **Developments in Statistics**.Ljubljana: FDV, 2002

KHAIER, F.A. Soil Salinity detection using Satellite Remote Sensing. Tese (Master of Science in Geo-information Science and Earth Observations). **International Institute for Geo-information Science and Earth Observation**.Enschede, The Netherlands.2003.

LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V. & BORGHI, E. **Geoprocessamento e agricultura de precisão**.Guaíba: Agropecuária, 2001. 118 p.

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

LARCHER, W. **Physiological plant ecology**. 3ed. Berlin: Springer – Verlag, 1995. 506p.

LEÃO, R. A. O. Caracterização fisiográfica e simulação hidrológica em reservatórios da bacia do Jaguaribe-Ce. Viçosa, Minas Gerais. 2010. 153 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa.

LEGATES, D. R.; MCCABE Jr., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v.35, n.1, p.233-241, 1999.

LEITE, F. A. B.; LEITE, F. R. B.; GOMES, E. C. B.; BRAGA, E. L.; BARRETO, M. M. S.; MOTA, F. O. B.; ROMERO, R. E. Solos do Estado do Ceará: atualização taxonômica. Parte II – Terra Roxa Estruturada Similar, Brunizem Avermelhado, Bruno Não Cálxico, Planossolo, Cambissolo, Vertissolo, Solonetz Solodizado, Solonchak Sonotétzico, Laterita Hidromórfica, Solo Aluvial, Solo Litólico, Regossolo, Areia Quartzosa. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 31., 2007b, Gramado-RS. Anais... Gramado: SBCS.

LEITE, F. R. B.; GOMES, E. C. B.; BRAGA, E. L.; LEITE, F. A. B.; BARRETO, M. M. S.; MOTA, F. O. B.; ROMERO, R. E. Solos do Estado do Ceará: atualização taxonômica. Parte I – Latossolos e Podzólicos. In: **Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, 31., 2007a, Gramado-RS. Anais... Gramado: SBCS.

LÉLLIS, F. S.; BARROSO, G. F.. Modelagem geoestatística da precipitação pluviométrica na bacia do rio Jacaraípe, Serra (ES). Anais XV **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, p.5201. 2011.

LENNON, J. J.; TURNER, J. R. G. Predicting the spatial distribution of climate: temperature in Great Britain. **Journal of Animal Ecology**, n.64, p.392-670, 1995

LOPES, F. B., ANDRADE, E. M.; ARRAES, F. D. D.; CHAVES, L. C. G.. Estimativa da Erosividade das Chuvas (R) no Estado do Ceará. **XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**. Petrolina, PE. 2009.

LOPES, F. B.. Índice de Sustentabilidade do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, Ceará. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal do Ceará. 2008. 118p.

MADYAKA, M. Spatial Modelling and Prediction of Soil Salinization using SaltMod in a GIS Environment. **Tese**. Geo-information Science and Earth Observation. 140p. 2008.

MALTCHICK, L. Ecologia de rios intermitentes tropicais. In: Pompêo, M. L. M. (ed.) **Perspectivas da Limnologia no Brasil**. São Luís: Gráfica e Editora União, 198 p. 1999. Disponível em: < <http://www.ib.usp.br/limnologia/Perspectivas/arquivo%20pdf/Capitulo%205.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2009.

MANGABEIRA, J. A. de C., AZEVEDO, E. C. de, LAMPARELLI, R. A. C. **Avaliação do levantamento do uso das terras por imagens de satélite de alta e média resolução espacial**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2003. 16 p, (Comunicado Técnico, 11). Disponível em: <http://www.cnpm.embrapa.br/publica/serie.htmlr>>. Acesso: 15 jun 2011.

MAROCO, J. **Análise estatística com utilização do SPSS**. Edições Silabo. 2ª edição. Lisboa. 2003. 509p.

MELLO, C. R., LIMA, J. M., SILVA, A. M., MELLO, J. M., OLIVEIRA, M. S.. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:925-933, 2003.

MELO, J. G.; OLIVEIRA, J.; A., JUNIOR, P.; GUIMARÃES, J, R. 2007.

Enquadramento dos corpos de água para a bacia hidrográfica do rio Doce, RN. Projeto de Fortalecimento Institucional do IDEMA. IDEMA/FUNPEC. V. 1. 326 p.

METTERNICHT, G., ZINCK, A.,J.. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. **Remote Sensing of Environment**. V. 85. 2003. P.1- 20.

METTERNICHT, G., ZINCK, A.,J.. **Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management**. 374 p. CRC Press Taylor & Francis Group. 2009.

MONTEIRO, V. P.; PINHEIRO, J. C. V. Critério para implantação de tecnologias de suprimentos de água potável em municípios cearenses afetados pelo alto teor de sal. **Revista de Economia Rural**, v. 42, n. 02, p. 365-387, 2004.

MORAIS, C. D.; CAVALCANTE, L. F.; ARRUDA, N. T. Ação do gesso agrícola sobre algumas propriedades físico-hídricas de um solo irrigado. **Anais do Congresso do Curso de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água**, Areia, v.17, p.5-16, 1997.

MOTA, L. H. S. O.; VALLADARES, G. S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n1, 39-50p, 2011.

MOTA, L.H.S.O. Dinâmica de uso e riscos ambientais das terras do Baixo Acaraú. **Dissertação**. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Universidade Federal do Ceará. 155p. 2011.

NASA.National Aeronautics and Space Administration, 2009.**Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Disponível em: <www2.jpl.nasa.gov/srtm>. Acesso em: 12 setembro de 2010.

OLDEMAN, L.R., HAKKELING, R.T.A., SOMBROEK, W.G. **World map of the status of human-induced soil degradation: An exploratory note (GLASOD project)**. 1991.

PALÁCIO, H. A. Q. Índice de qualidade das águas na parte baixa da Bacia Hidrográfica do Rio Trussu, Ceará. 96p. 2004. **Dissertação** (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

PEDREÑO, N. et al. Estimation of soil salinity in semi-arid land using a geostatistical model. **Land Degradation & Development**, 2007. 18 (3): p. 339-353

- PRUDHOMME C., REED D.W. Mapping extreme rainfall in a mountainous region using geostatistical techniques: A case study in Scotland, **International Journal of Climatology**, 19, 1337-1356. 1999
- QADIR, A. M GHAFUOR, AND G. MURTAZA, Amelioration strategies for saline soils: a review. **Land Degradation & Development**. 11 (6): p. 501-521. 2000
- REIS. M.H. et al.. Espacialização de dados de precipitação e avaliação de interpoladores para projetos de drenagem agrícola no estado de Goiás e Distrito Federal. **Anais do XII Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. 2005.
- RIBEIRO, M.R. Origem e classificação de solos afetados por sais. In: **Manejo da Salinidade na Agricultura: Estudos Básicos e Aplicados**. Ed.: Gheyi, H.R., Dias, N.S & Lacerda, C.F. Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade. Fortaleza-Ce. 2010. 472p.
- RICHARDS, L. A. (Ed.) 1954. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils**. USDA Agriculture Handbook 60, Washington D. C.
- ROMERO, R. E.; FERREIRA, T. O. Morfologia e classificação dos solos predominantes no semiárido cearense. In: ANDRADE, E. M.; PEREIRA, O. J.; DANTAS, F. E. R. **Semiárido e o manejo dos recursos naturais**. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2010. cap. 2, p. 23-55
- SACCON, P. P.; HARUM, T.; RUCH, C.; CALASANS, N. Mapping of hidrologic vulnerability zones and quality of water. In: **Decision Support System for Sustainable Ecosystem Management in Atlantic Rain Forest Rural Areas – ECOMAN NEWSLETTER**. 2003.
- SAMPAIO, J.L.F., MATOS, K.S.L., SALES, C.M.V., PINHEIRO, F. Políticas de acesso a Terra – Território do Sertão Central. **Ceará Diagnóstico**. Natural Resources Institute. Research Paper. 2005. 83p.
- SANTANA, E.W. **Cenário atual dos recursos hídricos do Ceará**. Instituto de Pesquisas para o Desenvolvimento do estado do Ceará - INESP. 88p. Fortaleza, CE. 2008.
- SANTOS, C.A.C., BRITO, J.I.B., RAO, T.V.R.R., MENEZES, H.E.A.; Tendências dos Índices de Precipitação no Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.1, 39-47, 2009.
- SHRESTHA, DP, AS SOLIMAN, AND A. FARSHAD, Salinity mapping using geopedologic and soil line approach. In: **ACRS 2005: proceedings of the 26th Asian Conference on Remote Sensing**, ACRS 2005, 7-11 November 2005, Hanoi, Vietnam. Hanoi: Asian Association on Remote Sensing (AARS), Geoinformatics Center, Asian Institute of Technology, 2005. 6 p. 2005.

SHRESTHA, R. P. Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand. **Land Degradation & Development**. 17 (6): p. 677-689. 2006.

SILVA JÚNIOR, L.G.A., GHEYI, H.R., MEDEIROS, J.F. Composição química de águas do cristalino do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.1, p.11-17, 1999.

SILVA, J. X.. . Rio de Janeiro: edição do autor, 2001. 227 p.

SILVEIRA, S.S.; ANDRADE, E.M. Análise de componentes principais na investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**. v.22, n.2, p.174-177, 2002.

SOUZA, M. J. N., LIMA, F. A. M., PAIVA, J. B. Compartimentação Topográfica do Estado do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v.9 (1-2), p.77-86, Dezembro, 1979.

SUASSUNA, J. A. Pequena Irrigação do Nordeste: algumas preocupações. **Revista Ciência Hoje**, v. 8. n. 104. p. 38 – 43, 1994.

THONTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v.38, n.1, p.55-94, 1948.

UNESCO, 1979. **Aridity definition** (UN documents), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, New York.
<http://www.unesco.org/new/en/unesco/resources/publications/> Acesso em 15/10/2010

USSL STAFF – United States Salinity Laboratory. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1954. 160p. Handbook 60. 1954

UTSET, A., BORROTO. M. A modeling-GIS approach for assessing irrigation effects on soil salinization under global warming conditions. **Agricultural Water Management** 50; 53-63. 2001.

VALLADARES, G.S, FARIA, A.L.L.. SIG na análise do risco de salinização na bacia do Rio Coruripe, AL. **Engevista**, v. 6, n. 3, p. 86-98, 2004

VALLADARES, G.S.. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciências dos Solos**. V.32: p.285-296, 2008.

VALLADARES, G.S.; GUIMARÃES, M, BATISTELLA, M.. Susceptibilidade à erosão das terras na Região Oeste do Estado da Bahia. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2002. (**Comunicado Técnico** 10).

VERDINELLI, M. A. Análise inercial em ecologia, 1980, 162p., **Tese** (Doutorado em Engenharia de Produção) Universidade de São Paulo: São Paulo

- VIEIRA, P.P.B.V. **Análise de Risco em Recursos Hídricos**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, V.10. 2005. 361p.
- VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F. de; Alvarez, V. V. H.; Schaefer, (ed.), C. E. G. R. **Tópicos em Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54, 2000.
- WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; MADRUGA, P. R de A. Avaliação de classificação digital em imagens de vídeo multiespectral utilizando matriz confusão. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava-PR, v. 5, n. 1, p. 47-57, jul./dez. 2003.
- WIEBE, B.H., EILERS, W.D., BRIERLEY J.A..**Risk of Soil Salinization**: Provincial coverage (Alberta, Saskatchewan, Manitoba), 1981 to 2006. Agri-Environmental Indicator Report Series - Report No. 3. 2011. Disponível em <http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/>acesso em 15 de agosto de 2011.
- YANG, M. A., LIU, S.L., YANG, A. Z., SUN, A.T., BEAZLEY, R.. Multivariate and geostatistical analysis of wetland soil salinity in nested areas of the Yellow River Delta. **Australian Journal of Soil Research**, 2009, 47, 486–497.
- ZIMBACK, C. R. L. Análise especial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo. Botucatu, 2001. 114p. **Tese** (Livre Docente em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Formulário preenchido por 8 (oito) especialistas em salinidade do solo, pesquisadores do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade – INCTSal

Dentro da linha de pesquisa “Diagnóstico das Áreas Afetadas por Sais e Qualidade de Água para Irrigação”, está sendo desenvolvido um trabalho de dissertação apresentado ao curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da UFC. O trabalho tem como objetivo a identificação das áreas em risco de salinização dos solos em todo o Estado do Ceará. O estudo utiliza três modelos para determinar o risco de salinização: Média Aritmética Simples, Modelo elaborado com uso de Análise da Componente Principal, e modelo definido segundo a opinião de Especialistas em salinidade. Resultados preliminares indicaram como mais robusto o modelo definido segundo a opinião do especialista, o que evidencia o caráter insubstituível da opinião dos especialistas da área neste tipo de estudo. Diante desta constatação e com o objetivo de melhorar a qualidade do trabalho desenvolvido, a equipe envolvida na elaboração deste estudo solicita aos membros do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSAL) sua opinião quanto aos parâmetros considerados como atuantes no processo de salinização dos solos.

O mapeamento das áreas de risco e o monitoramento são essenciais no acompanhamento da salinidade, na previsão do processo de degradação e na fundamentação da tomada de decisões relativas ao uso sustentável ou às ações de recuperação dos solos. Considerando o processo de salinização como resultado da interação de diversos fatores, sejam eles, físicos, ambientais ou devidos à ação antrópica, foram considerados os seguintes parâmetros na elaboração do Mapa de Risco de Salinização dos Solos do Estado do Ceará: clima, tipo de solo, condutividade elétrica da água, malha hídrica, relevo, geologia e uso e ocupação do solo. A opinião de especialistas em salinidade é necessária para a quantificação percentual da influência de cada um desses parâmetros considerados no processo de salinização. O julgamento dos especialistas será utilizado na elaboração do modelo a ser utilizado para geração do Mapa de Risco de Salinização dos Solos do Estado do Ceará. Considerando que o somatório das influências relativas de cada um dos parâmetros corresponde a 100%,

atribuir um valor percentual que, segundo a sua opinião, será considerado como a influência deste parâmetro no processo de salinização dos solos no Ceará.

*Campo de Preenchimento Obrigatório

Clima *

Considera o Índice de Aridez de modo que solos situados em regiões mais áridas são considerados de maior risco de salinização

Tipo de Solo *

Considera as características de drenagem predominantes em cada tipo de solo de modo que solos com melhor drenagem são considerados de menor risco de salinização

Condutividade Elétrica da Água *

Considera a condutividade elétrica da água dos principais reservatórios de águas superficiais do Estado, de modo que, quanto maior a CE da água, maior o risco de salinização do solo

Malha Hídrica *

Considera a proximidade dos solos dos principais rios e afluentes do Estado, de modo que, quanto maior a proximidade do centro do rio, maior o risco de salinização

Relevo *

Considera a declividade natural do solo, de modo que, quanto maior a declividade, menor o risco de salinização.

Geologia *

Considera as formações litológicas como prováveis fontes de sais nos solos

Uso e Ocupação do Solo*

Considera os principais usos dos solos do Estado tais como agricultura, áreas urbanas, áreas de solo descoberto, áreas com vegetação preservada, etc.
