



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



GLAUBER VINÍCIUS PINTO DE BARROS

DISSERTAÇÃO

**ANÁLISE TEMPORAL DO POTENCIAL DE DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DO
SOLO NO ESTADO DE SERGIPE**

Maceió/AL
Fevereiro de 2021.

GLAUBER VINÍCIUS PINTO DE BARROS

DISSERTAÇÃO

**ANÁLISE TEMPORAL DO POTENCIAL DE DEGRADAÇÃO AMBIENTAL DO
SOLO NO ESTADO DE SERGIPE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia: Sensoriamento Remoto e Hidrometeorologia da Universidade Federal de Alagoas.

Orientador: Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio de Rezende Nascimento.

Maceió/AL
Fevereiro de 2021.

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

B277a Barros, Glauber Vinicius Pinto de.

Análise temporal do potencial de degradação ambiental do solo no estado de Sergipe / Glauber Vinicius Pinto de Barros. – 2021.
108 f. : il. color.

Orientador: Heliofábio Barros Gomes.

Coorientador: Paulo Sérgio de Rezende Nascimento.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 92-108.

1. Degradação do solo – Sergipe. 2. Lógica fuzzy. 3. Geoprocessamento.
I. Título.

CDU: 551: 631.4 (813.7)

*“O aspecto mais triste da vida hoje em dia, é que
a ciência ganha em conhecimento muito mais do
que a sociedade ganha em sabedoria.”*

(Isaac Asimov)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, Antonino Elias de Barros Filho e Miriam Francisca Pinto, por sempre terem me apoiado e confiado em todas as minhas escolhas em relação a vida acadêmica desde a escolha da graduação e terem me dado todo suporte para que eu seguisse minhas metas. A minha namorada Gabriela Maria Oliveira de Jesus, por toda a parceria, amizade, cumplicidade, paciência e amor durante todo o tempo em que precisei me dedicar ao trabalho, num ano já bastante complicado como foi, infelizmente, 2020.

AGRADECIMENTOS

Serei eternamente grato a todos os professores do ICAT, descobri que a meteorologia era algo que eu sempre amei e não tinha tido a oportunidade de conhecer antes. Gostaria de agradecer em especial ao professor Dr. Heliofábio Barros Gomes, por ter me acolhido, recebido e orientado muito bem no ICAT e no Sensorgeo e ao professor Dr. Paulo Sergio de Rezende Nascimento da Universidade Federal de Sergipe, pela orientação, parceria, amizade e paciência desde os tempos de graduação. Gostaria de agradecer também aos professores Drs. Helber Barros Gomes, Rafaela Lisboa Costa e Fabrício Daniel dos Santos Silva por terem aceitado participar da Banca Examinadora. Agradeço ainda a dois irmãos que a vida e o Mestrado em Meteorologia da UFAL me deram durante o tempo que morei em Maceió, Felipe Souza dos Santos e Eli Moises dos Santos Silva, vocês tornaram tudo muito mais alegre e simples.

A UFAL e ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do ICAT por me concederem oportunidade de formação. A CAPES pela concessão de bolsa de estudos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de tipos de degradação do solo com foco no NEB entre os anos de 1987 e 1991. Fonte: Adaptado de Oldeman et al. (1991).....	20
Figura 2 - Estrutura de um controlador de lógica fuzzy. Adaptado de Vieira et al. (2014).	30
Figura 3 - Mapa de localização do estado de Sergipe. Fonte: elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).	32
Figura 4 - Mapa de divisão climática do estado de Sergipe. Fonte: elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMARH/SRH, 2014).	35
Figura 5- Mapa de isoietas de precipitação para o estado de Sergipe: Fonte: adaptado e elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).	36
Figura 6 - Mapa dos territórios do estado de Sergipe: Fonte: adaptado e elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).	37
Figura 7 - Mapa da divisão dos biomas do estado de Sergipe. Fonte: elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).	38
Figura 8 - Mapa de Formações geológicas do estado de Sergipe. Fonte: adaptado e elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).	40
Figura 9 - Mapa de unidades geomorfológicas do estado de Sergipe. Fonte: elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).	41
Figura 10 - Mapa das classes de solo do estado de Sergipe. Fonte: adaptado e elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).	42
Figura 11 - Fluxograma das etapas para a produção dos mapas do potencial de degradação do solo.....	43
Figura 12 - Mapas de pluviometria média para os anos de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe segundo os dados do TRMM, disponíveis no portal Giovanni.	45
Figura 13 - Mapa das classes de erodibilidade do solo para o estado de Sergipe.	46
Figura 14 - Mapas de distribuição do EVI para os anos de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe segundo os dados do produto MOD13A3 do MODIS, disponíveis no portal Earth Data Search.	48
Figura 15 - Mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe segundo os dados do produto MapBiomas.	49
Figura 16 - Mapas de declividade (a) e altitude (b) para o estado de Sergipe segundo os dados do disponíveis pelo projeto Topodata.....	50

Figura 17- Algoritmo usado para atribuir os valores fuzzy para cada uma das classes de uso e ocupação do solo, para os anos de 2000 e 2019.	52
Figura 18 - Distribuição dos valores fuzzy para a precipitação no ano de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe.	59
Figura 19 - Distribuição dos valores fuzzy para o EVI no ano de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe.	60
Figura 20 - Distribuição dos valores fuzzy referente a declividade para o estado de Sergipe.	60
Figura 21- Distribuição dos valores fuzzy referente a altitude para o estado de Sergipe.....	61
Figura 22 - Distribuição dos valores fuzzy referente a altitude para o estado de Sergipe.....	62
Figura 23 - Distribuição dos valores fuzzy referentes ao uso e cobertura do solo nos anos de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe.	62
Figura 24- Distribuição dos valores fuzzy referente a geologia para o estado de Sergipe.	63
Figura 25- Distribuição dos valores fuzzy referente a geomorfologia para o estado de Sergipe.	63
Figura 26 - Distribuição dos valores fuzzy referente a pedologia para o estado de Sergipe....	64
Figura 27- Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,2 para o ano 2000.	65
Figura 28 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,4 para o ano 2000.	66
Figura 29 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,6 para o ano 2000.	67
Figura 30- Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,8 para o ano 2000.	69
Figura 31- Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,2 para o ano 2019.	70
Figura 32 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,4 para o ano 2019.	71
Figura 33 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,6 para o ano 2019.	73
Figura 34 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,8 para o ano 2019.	74
Figura 35 - Mapa de áreas onde ocorreram mudança na classificação do potencial de degradação ambiental do solo.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores <i>fuzzy</i> atribuídos a cada um dos domínios geológicos.....	53
Tabela 2 - Valores <i>fuzzy</i> atribuídos a cada uma das classes geomorfológicas.	54
Tabela 3 - Tipos de solo e seus valores <i>fuzzy</i> atribuídos.	55
Tabela 4 - Classes de potencial de degradação ambiental do solo.	56
Tabela 5 - Correspondência entre os valores de r e o Índice de Correlação de Pearson.	58
Tabela 6 - Áreas das classes de potencial de degradação ambiental do solo ($\gamma = 0,2$) para o ano 2000.....	65
Tabela 7 - Áreas das classes de potencial de degradação ambiental do solo ($\gamma = 0,4$) para o ano 2000.....	67
Tabela 8 - Áreas das classes de potencial de degradação ambiental do solo ($\gamma = 0,6$) para o ano 2000.....	68
Tabela 9 - Áreas das classes de potencial de degradação ambiental do solo ($\gamma = 0,8$) para o ano 2000.....	69
Tabela 10 - Área das classes de Potencial de degradação ambiental do solo, γ igual a 0,2 para o ano 2019.....	71
Tabela 11 - Área das classes de Potencial de degradação ambiental do solo, γ igual a 0,4 para o ano 2019.....	72
Tabela 12 - Área das classes de Potencial de degradação ambiental do solo, γ igual a 0,6 para o ano 2019.....	74
Tabela 13 - Área das classes de Potencial de degradação ambiental do solo, γ igual a 0,8 para o ano 2019.....	75
Tabela 14 - Coeficiente de Pearson e correlações para as variáveis de estudo.	76
Tabela 15 - Tipos de mudanças nas classes de potencial de degradação e suas áreas.	87
Tabela 16 - Área das classes de potencial de degradação do solo em 2000 e 2019 e suas diferenças.....	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CBERS	<i>China-Brazil Earth-Resources Satellite</i>
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
GLASOD	<i>Global Assessment of Soil Degradation</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LAI	<i>Leaf Area Index</i>
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NEB	Nordeste do Brasil
NIR	<i>Near Infrared</i>
OFG	<i>Operador Fuzzy Gamma</i>
SEAGRI	Secretaria do Estado de Agricultura de Sergipe
SEMARH	Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SFB	Sistema Florestal Brasileiro
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SRC	Sistema de Referência de Coordenadas
SRH	Superintendência de Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>
TIR	Termal Infrared
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>

UTM	Universal Transversa de Mercator
VIS	Visível
WGS-84	World Geodetic System 1984

RESUMO

A avaliação do potencial de degradação ambiental do solo constitui um estudo de fundamental importância na manutenção da conservação dos solos e do meio ambiente, bem como auxilia na elaboração de planos de manejo de áreas degradadas e de Unidades de Conservação, assim como no planejamento territorial em áreas urbanas e rurais. A condução de estudos de campo para a aferição do potencial à degradação do solo são caros e demandam muito tempo, o que faz com que estimativas realizadas através de modelos matemáticos sejam adotadas por muitos pesquisadores e especialistas no assunto. O presente trabalho tem por objetivo geral comparar a situação do potencial de degradação ambiental do solo, do ano 2000 com a do ano 2019, no estado de Sergipe, pela lógica *fuzzy* em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas. O modelo proposto explora relações de causa-efeito do princípio fundamental das relações específicas entre as variáveis que influenciam a elevação do potencial de degradação ambiental do solo a partir de equações de pertinência e do Operador *Fuzzy Gamma* para tratar dados referentes a: geologia, geomorfologia, declividade, hipsometria, pedologia, precipitação, erodibilidade, índice de vegetação e uso e ocupação do solo. Observou-se que os fatores que contribuem para o aumento do potencial de degradação foram, geologia, geomorfologia, pedologia e precipitação. Em relação a mudança de potencial de degradação ambiental do solo, foi possível observar que entre os anos de 2000 e 2019, 17,66% da área mudou para uma classe maior de potencial, 13,87% para uma classe menor e 68,48% não teve mudança de classe. No entanto, grande parte da área onde não houve mudança obteve um potencial muito alto nos dois anos avaliados. O produto final do modelo indica as regiões que reúnem mais ou menos fatores de promoção de processos que contribuem para o aumento do potencial de degradação ambiental do solo e, portanto, referentes aos dados de entrada utilizados, sendo assim, valiosa ferramenta para tomada de decisão na elaboração de planos e programas de prevenção e controle.

Palavras-chaves: Geoprocessamento, *Lógica Fuzzy*, Meio Ambiente.

ABSTRACT

The assessment of the potential for environmental degradation of the soil is a study of fundamental importance in helping to conserve the soil and the environment, as well as helping in the preparation of management plans for degraded areas and Conservation Units, as well as in territorial planning in urban and rural areas. Conducting field studies to assess the potential for soil degradation is expensive and time-consuming, which means that mathematical models has been adopted by many researchers and specialists on the subject. The present work has as general objective to compare the situation of the potential of environmental degradation of the soil, of the year 2000 with that of the year 2019, in the state of Sergipe, by the fuzzy logic in an environment of the Geographic Information System. The proposed model explores cause-and-effect relationships of the fundamental principle of specific relationships between variables that influence the elevation of the potential for environmental degradation of the soil from equations of pertinence and from the Operator Fuzzy Gamma to treat data related to: geology, geomorphology, slope, hypsometry, pedology, ease, erodibility, vegetation index and land use and occupation. It was observed that the factors that contribute to the increase in the potential for degradation were geology, geomorphology, pedology and precipitation. Regarding the change in the potential for environmental degradation of the soil, it was possible to observe that between the years 2000 and 2019, 17.66% of the area changed to a higher class of potential, 13.87% to a smaller class and 68.48% there was no change of class. However, the area where there was no change had a very high potential in the two years evaluated. The final product of the model indicates the regions that bring together more or less factors to promote processes that contribute to the increase in the potential for environmental degradation of the soil and, therefore, referring to the input data used, being, therefore, a valuable tool for decision making. in the preparation of prevention and control plans and programs.

Keywords: Geoprocessing, Fuzzy Logic, Environment.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	OBJETIVOS.....	17
2.1	Objetivos específicos	17
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	Degradação Ambiental.....	18
3.2	Degradação do Solo	18
3.3	Erosão	23
3.4.	Fatores que influenciam na degradação do solo	24
3.4.1	Uso e cobertura do solo	24
3.4.2.	Geomorfologia.....	25
3.4.3.	Geologia.....	25
3.4.4.	Pluviometria.....	25
3.4.5.	Erodibilidade	26
3.4.6.	Pedologia	27
3.5.	Geotecnologias.....	27
3.5.1.	Geoprocessamento.....	28
3.5.2.	Sensoriamento Remoto.....	28
3.6.	Lógica Fuzzy.....	29
4.	MATERIAIS E MÉTODO.....	32
4.1	Área de Estudo.....	32
4.1.1.	Clima	33
4.1.2.	Biomass.....	37
4.1.3.	Geologia.....	38
4.1.4.	Geomorfologia.....	40
4.1.5.	Pedologia	42
4.2.	Metodologia	43
4.2.1.	Aquisição e tratamento dos dados	44
4.2.1.1.	Precipitação	44
4.2.1.2.	Erodibilidade	45
4.2.1.3.	Índice de Vegetação Melhorado (Enhanced Vegetation Index - EVI).....	46
4.2.1.4.	Uso e cobertura do solo	48
4.2.1.5.	Declividade e Altitude	49
4.2.1.6.	Geologia, geomorfologia e Pedologia	50

4.3.	Fuzzificação dos dados	50
4.3.1.	Precipitação	51
4.3.2.	EVI.....	51
4.3.3.	Declividade.....	51
4.3.4.	Altitude	52
4.3.5.	Erodibilidade	52
4.3.6.	Uso e cobertura do solo	52
4.3.7.	Geologia.....	53
4.3.8.	Geomorfologia.....	54
4.3.9.	Pedologia	54
4.4.	Aplicação do Operador <i>Fuzzy Gamma</i>	55
4.5.	Cálculo das áreas para cada um dos valores de <i>gamma</i>	57
4.6.	Cálculo das regressões lineares entre os dados fuzzificados e o resultado obtido para o <i>gamma</i> igual a 0,6 para os anos de 2000 e 2019.....	57
4.7.	Cálculo das mudanças de classes entre 2000 e 2019	58
5.	RESULTADOS	59
5.1.	Variáveis fuzzificadas.....	60
5.1.1.	Precipitação.....	60
5.1.2.	EVI.....	60
5.1.3.	Declividade.....	61
5.1.4.	Altitude.....	62
5.1.5.	Erodibilidade.....	62
5.1.6.	Uso e cobertura do solo.....	63
5.1.7.	Geologia.....	64
5.1.8.	Geomorfologia.....	64
5.1.9.	Pedologia.....	65
5.2.	Mapas de classes de potencial de degradação ambiental do solo	59
5.2.1.	Cenário obtido com <i>gamma</i> igual a 0,2 para o ano 2000	64
5.2.2.	Cenário obtido com <i>gamma</i> igual a 0,4 para o ano 2000	66
5.2.3.	Cenário obtido com <i>gamma</i> igual a 0,6 para o ano 2000	67
5.2.4.	Cenário obtido com <i>gamma</i> igual a 0,8 para o ano 2000	68
5.2.5.	Cenário obtido com <i>gamma</i> igual a 0,2 para o ano 2019	70
5.2.6.	Cenário obtido com <i>gamma</i> igual a 0,4 para o ano 2019	71
5.2.7.	Cenário obtido com <i>gamma</i> igual a 0,6 para o ano 2019	72

5.2.8 Cenário obtido com <i>gamma</i> igual a 0,8 para o ano 2019.....	74
5.3. Análise das correlações.....	75
5.4. Análise das classes de potencial ambiental de degradação do solo	77
5.4.1. Aspectos geológicos.....	77
5.4.2. Aspectos geomorfológicos	78
5.4.3. Aspectos pedológicos.....	81
5.4.4. Aspectos pluviométricos	83
5.4.5. Aspectos do uso e ocupação do solo	84
5.5. Mudança das classes de potencial de degradação ambiental do solo	87
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	90
REFERÊNCIAS	92

1. INTRODUÇÃO

O ambiente está sempre num processo dinâmico devido às diversas fontes de entrada e saída de matéria e energia que formam os sistemas que o compõe. Seja devido à intervenção antrópica de forma direta ou indireta, ou de forma natural, o ambiente pode se encontrar diante de diferentes níveis de suscetibilidade, vulnerabilidade e degradação ambiental, o que pode colocar em risco não só o próprio ambiente, mas os seres vivos que dele dependem. A avaliação quantitativa da degradação ambiental, se torna de importância fundamental para entender como se dão as transformações que ocorrem no ambiente, uma vez que essas transformações podem ameaçar diretamente a vida no planeta, afetar o equilíbrio da biodiversidade, e a exploração de recursos renováveis e a alteração global do clima.

A lei 6.938/81, sobre política nacional do meio ambiente, define que meio ambiente é o conjunto de condições, leis, influências, e interações de ordem física, química e biológica, que permite, abriga e rege a vida em todas as suas formas (BRASIL, 1981). Para Silva (1995), meio ambiente é a interação do conjunto de elementos naturais, artificiais e culturais que propiciem o desenvolvimento equilibrado da vida em todas as formas. Em seu trabalho, Marques (2010) cita o dicionário de ecologia e ciências ambientais e define meio ambiente como a soma total das condições externas circundantes no interior das quais um organismo, uma condição, uma comunidade ou um objeto existe, acrescentando-se que os organismos podem ser parte do ambiente de outro organismo.

O que se verifica atualmente é que o crescente desenvolvimento econômico das cidades, estados e nações causou o adensamento de pessoas num mesmo local. Esse desenvolvimento, na maioria dos casos desordenado, degrada o ambiente natural provocando alteração de elementos físicos, químicos e bióticos das paisagens urbanas e rurais.

Segundo Rubira (2016), nota-se, atualmente, a importância que as áreas com os remanescentes de cobertura vegetal exercem em relação à manutenção e o equilíbrio do meio ambiente, como a proteção contra o assoreamento dos cursos d'água, proteção dos solos quanto à erosão, regularização dos regimes hídricos, dentre outros fatores. O maior problema dessas áreas verdes protegidas, principalmente as que exercem a função de proteção integral é quando elas estão inseridas em áreas urbanas.

Segundo Balsan (2009), um conjunto de causas é apontado como responsáveis pelo atual processo de degradação que atinge diversas partes do mundo. Dentre elas destacam-se: intervenção humana, crescimento populacional, práticas inadequadas na agropecuária e construções de complexos industriais.

Machado (2012), apontou que a degradação no Brasil teve início com o desmatamento do território brasileiro primeiramente no litoral com a destruição da mata atlântica no Nordeste para a extração do pau Brasil. O processo de degradação da cobertura vegetal acelerou-se com a introdução da cultura da cana de açúcar e posteriormente com a criação de gado. Já segundo Poletto (2009), a degradação ambiental está relacionada com a agricultura, pois ocorre a remoção da cobertura vegetal, exposição do solo à erosão, afastamento da fauna, compactação do solo, redução da qualidade dos cursos d'água assoreando-os e contaminando-os com resíduos de fertilizantes e agrotóxicos. Já Fernandes e Medeiros (2009), afirmaram que a região Nordeste, por possuir características limitantes para algumas atividades agropastoris e devido um histórico de ações mitigadoras equivocadas, se encontra com sérios problemas de ordem ambiental, principalmente pelo desmatamento e queimadas.

O estado de Sergipe, que será objeto de estudo deste trabalho, localizado no nordeste brasileiro, apresenta diversas atividades com potencial de degradação ambiental do solo, como agricultura e agropecuária, atividades de extração de minérios (calcário, ferro, areia, manganês, potássio e petróleo. Apesar de ser o menor estado da federação, Sergipe possui em seu território os biomas Caatinga (bioma exclusivamente brasileiro) e Mata atlântica, no entanto, não possui um estudo que avalie o potencial de degradação ambiental do solo para todo estado.

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (2014), o impacto da degradação do solo é canalizado para a economia principalmente por meio de setores chave para o desenvolvimento, como agricultura, água, saúde, e meio ambiente. Portanto, foi relatado que, devido à degradação do solo, cerca de 6 milhões de hectares de terras produtivas em todo o mundo foram perdidos a cada ano desde 1990.

Devido as dimensões espaciais e diversidade de aspectos que compreendem o meio ambiente e seus sistemas naturais e artificiais, os estudos dessas áreas necessitam da integração de múltiplas informações, a fim de realizar uma abordagem de forma ampla de suas características. São necessárias informações geológicas, geomorfológicas, pedológicas, de uso cobertura da terra, climáticas (temperatura e pluviometria por exemplo) entre outras. É nesse contexto que os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem ser utilizados de modo a integrar os dados de uma determinada área, permitindo que cientistas e pesquisadores realizem um diagnóstico das regiões mais suscetíveis aos problemas ambientais.

O uso das geotecnologias se torna fundamental para aquisição e tratamento de dados de forma a integrar e correlacionar as informações de uma determinada área. O sensoriamento remoto permite que diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos sejam adquiridos em larga escala a partir de satélites de diversas finalidades que orbitam a Terra, sem que haja a

necessidade de visita *in situ* para a coleta de informações. Já o geoprocessamento permite a integração dos dados obtidos pelo sensoriamento remoto, através de ferramentas de álgebra de mapas, estatística e Geoestatística.

Dentre as técnicas utilizadas para integrar os dados necessários para realizações de estudos ambientais com diversos objetivos está a lógica *fuzzy*, que vem sendo largamente aplicada por permitir uma análise matemática de processos e fenômenos naturais não discretos que ocorrem no meio ambiente. Pourghasemi et al. (2012) afirma que a lógica *fuzzy* é objetiva e direta de se entender e implementar. Esse método permite a utilização de dados em qualquer escala de medida e as ponderações dos atributos é controlada inteiramente pelo pesquisador. O método de lógica *fuzzy* permite combinações ponderadas de mapas e pode ser implementada rapidamente em *softwares* de ambiente SIG (Pradhan, 2010). Alguns exemplos encontrados na literatura utilizam lógica *fuzzy* implementada em SIG para a realização de estudos ambientais, entre eles: Costa et. al. (2006); Figueredo et al. (2007); Pourghasemi et al. (2012); Silva et. al. (2013); Silva Junior (2015); Amirahmadi et al. (2017); Sema et al. (2017); Jagabandhu e Saha (2019); Haidara et al. (2019).

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo geral comparar a situação do potencial de degradação ambiental do solo, do ano 2000 com a do ano 2019, no estado de Sergipe, pela lógica *fuzzy* em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas.

2.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, são propostos:

- Elaborar de mapas temáticos do potencial de degradação ambiental do solo do estado de Sergipe;
- Aplicar técnicas de geoprocessamento e estatística para identificar as áreas com maior potencial de degradação do solo;

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Degradação Ambiental

Diversos autores compartilham estudos acerca de impactos ambientais e de degradação ambiental, dentre eles, Meneguzzo e Chaicouski (2010), que afirmam que existem inúmeros conceitos de degradação, impacto ambiental e conservação da natureza na literatura nacional e internacional, porém, os mesmos devem ser observados e aplicados pela sociedade à luz das leis ambientais vigentes. A Lei 6.938 de 31 de agosto de 1981, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, define degradação ambiental como “alteração adversa das características do meio ambiente”.

Sánchez (2008) conceitua degradação ambiental como qualquer alteração adversa dos processos, funções ou componentes ambientais, ou como uma alteração adversa da qualidade ambiental, ou seja, degradação ambiental corresponde a um impacto ambiental negativo.

Segundo Guerra (2008), degradação ambiental é causada pelo homem que na maioria das vezes, não respeita os limites impostos pela natureza, sendo a degradação ambiental mais ampla que a degradação dos solos, pois envolve não só a erosão dos solos, mas também a extinção de espécies vegetais e animais, a poluição de nascentes, rios, lagos e baías, o assoreamento e outros impactos prejudiciais ao meio ambiente e ao próprio homem.

Para Louzada (2013), embora possa ser causada por efeitos naturais, a forma de degradação que mais preocupa governos e sociedades é aquela causada pela ação antrópica, que pode e deve ser regulamentada. A atividade humana gera impactos ambientais que repercutem nos meios físico-biológicos e socioeconômicos, afetando os recursos naturais e a saúde humana, podendo causar desequilíbrios ambientais no ar, nas águas, no solo e no meio sociocultural. Algumas das formas mais conhecidas de degradação ambiental são: a desestruturação física (erosão, no caso de solos), e a contaminação. Logo, pode-se notar que a degradação ambiental não é originada apenas pelo homem. A ação antrópica torna a degradação mais preocupante, mas, ela também pode ser originada por processos e fenômenos naturais, como por exemplo, um incêndio ocasionado por um raio em uma área florestal.

3.2 Degradação do Solo

Segundo Keesstra et al. (2018), o sistema terrestre teve seu funcionamento natural interrompido pelo uso desnecessário de recursos naturais, planejamento errôneo do uso da terra e mudanças climáticas que acabam contaminando o solo, a água e alterando o ciclo do carbono

e do nitrogênio, o que por sua vez está causando a degradação da terra. Atualmente, de acordo com Cerdà et al. (2017), gestores, silvicultores, agricultores e também políticos estão tomando diferentes decisões para a proteção do solo contra a erosão. Tendo em vista a crescente preocupação com a degradação do solo, que em 1987 a então Primeira Ministra da Noruega, Gro Harlem Brundtland, dirigiu uma Comissão com o objetivo de investigar a degradação dos solos e produziu um relatório intitulado *Nosso Futuro Comum*.

De acordo com Oldeman et al. (1990), nesse relatório está incluído um mapa do estado atual dos solos do mundo, chamado *Global Assessment of Soil Degradation* (GLASOD), em português Avaliação Global da Degradação dos Solos. Esse projeto foi desenvolvido principalmente na Universidade de Wageningen na Holanda, e resultou numa publicação intitulada Mapa Mundial do Estágio de Degradação dos Solos, induzida pelo Homem.

Segundo Guerra e Jorge (2012), o GLASOD estimou ainda que a perda de solos agrícolas se dê a uma taxa de 6 a 7 milhões de hectares/ano, com um adicional de 1,5 milhões de hectares perdidos, devido à exploração de madeira, salinização e acidificação. Dessa forma, a perda de solo não quer dizer necessariamente que a terra desapareça, embora localmente isso possa acontecer, devido a transgressão marinha, ou erosão de áreas costeiras. Normalmente, significa a deterioração das suas propriedades químicas e físicas, de maneira que o solo deixa de ser produtivo. Na Figura 1, que apresenta a classificação por tipo de degradação do GLASOD entre os anos de 1987 e 1991, com foco no Nordeste do Brasil (NEB), nota-se que para esta região os tipos mais frequentes de degradação do solo são: perda de nutrientes e matéria orgânica do solo por atividades agrícolas e agropecuárias, atingindo principalmente a porção norte do NEB e grande parte da Bahia; erosão eólica, que atingi as porções litorâneas do Rio Grande do Norte, Ceará e Maranhão e a parte oeste da Bahia; deformações nos terrenos e movimentos de massas, atingindo a porção nordeste do Maranhão e parte do centro-sul da Bahia; erosão hídrica, que atingi principalmente grande parte da região costeira do NEB e central da Bahia e do Ceará.

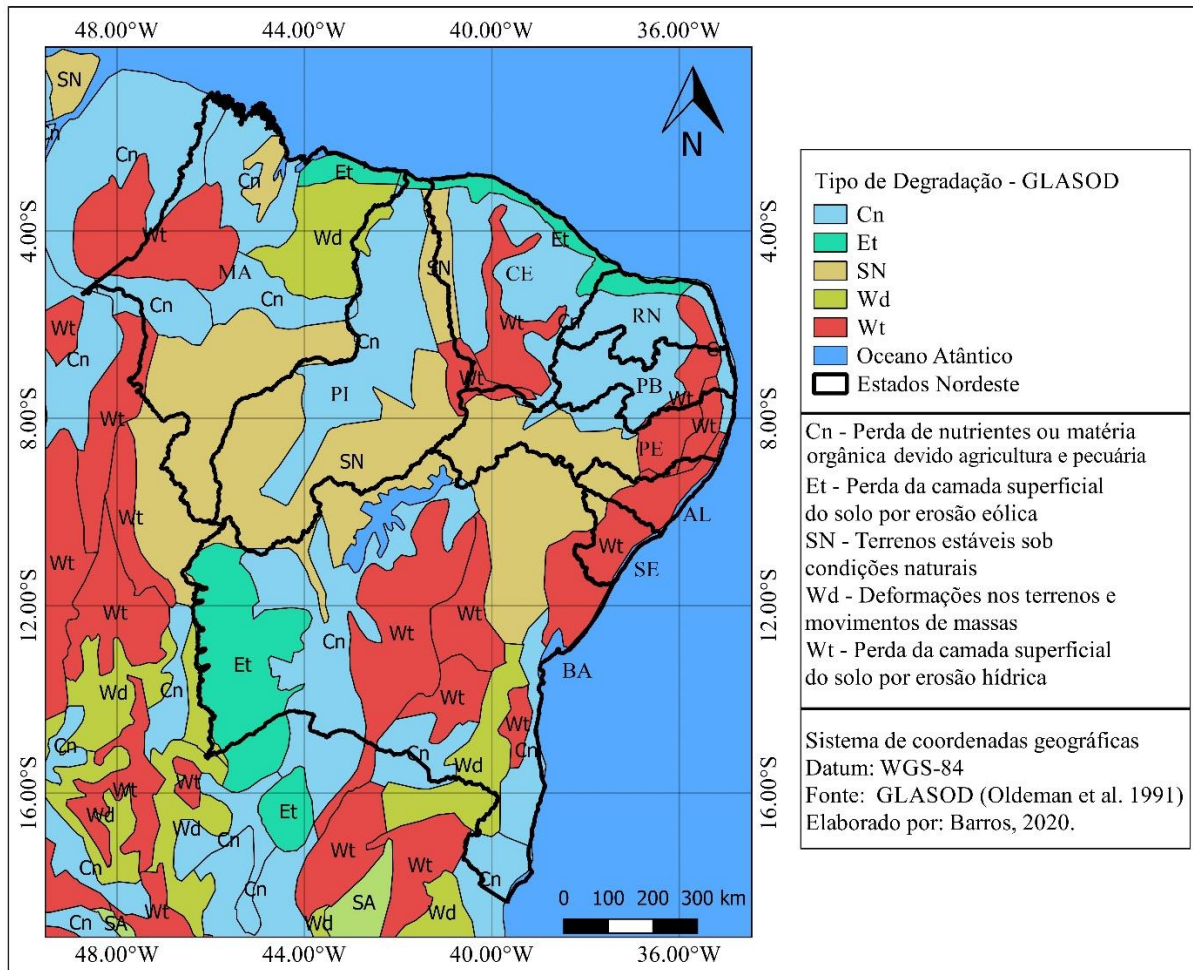


Figura 1 - Mapa de tipos de degradação do solo com foco no NEB entre os anos de 1987 e 1991. Fonte: Adaptado de Oldeman et al. (1991).

Para Parrota (1992), áreas degradadas são aquelas caracterizadas por solos empobrecidos e erodidos, instabilidade hidrológica, produtividade primária e biodiversidade reduzidas. Já Guerra (2008) define degradação do solo como modificações que atingem um solo, passando o mesmo de uma categoria para outra, muito mais lavada, quando a erosão começa a destruir as camadas superficiais mais ricas em matéria orgânica. A degradação do solo pode-se dar por modificações microclimáticas, por destruição do tipo de vegetação, entre outras formas.

Blum (1998), partindo do princípio de energia armazenada no sistema, propôs que o ambiente degradado é aquele caracterizado pela perda desta energia, apontando três formas diferentes de energias envolvidas: gravitacional, que é a energia que controla grande parte do movimento dos sólidos, líquidos e gases, e é determinante para os fenômenos de erosão e sedimentação; conservada, é a energia presente no material de origem. Esta fonte de energia é

proveniente das forças internas da Terra, pressão e temperatura; solar: é a energia que faz com que os vegetais transformem gás carbônico em componentes orgânicos fornecidos ao solo.

A partir deste conceito, em que as funções e usos do solo tem como base sua energia armazenada, Reinert (1998) afirma que degradação do solo é igual à perda de suas funções e usos, sendo a pedosfera o produto da interação da litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera. O autor supracitado usou o solo como base para classificação de área degradada, dividindo a degradação do solo em 3 categorias:

- Degradação física: refere-se as alterações de características ligadas ao arranjo das partículas do solo, tendo como principais parâmetros a permeabilidade, densidade, a estrutura, a aeração e coesão. Alto grau de compactação, baixa aeração, alta friabilidade, alta susceptibilidade à erosão, baixa retenção de água a alteração topográfica do terreno, são exemplos de degradação física do solo;
- Degradação biológica: esse tipo de degradação demonstra a baixa ou nula atividade da micro, meso e macrofauna e flora no solo. Isto é consequência dos baixos valores de matéria orgânica presente;
- Degradação química: esta forma de degradação é reflexo da presença de elementos indesejáveis no solo, ou então a perda de elementos essenciais para o equilíbrio deste. Por exemplo, a deposição de substâncias tóxicas em um aterro pode degradar quimicamente o solo.

De acordo com Kobiyama et al. (2001), são várias as atividades degradadoras, entretanto, algumas se sobressaem, como por exemplo:

- Agricultura: existem muitos fatores relacionados com a agricultura que podem causar degradação do solo, da água, do ar, dos organismos e da topografia. Entre estes merecem ênfase a inaptidão do ambiente, a compactação, o preparo do solo inadequado, o monocultivo, a irrigação inadequada, o superpastejo e a cobertura de solo insuficiente. A exploração do solo acima de sua capacidade de suporte resulta em dois tipos de problemas. Um de ordem econômica, pois o sistema irá exigir adições de insumos para manter a produtividade, e outro, ambiental, pois a capacidade de depuração do ambiente está acima das expectativas dos interventores da área;
- Mineração: a mineração não representa grande parcela em extensão, se comparada aos demais agentes degradadores. Sua ocorrência é pontual,

limitando-se a pequenas áreas, se comparadas à agricultura, por exemplo. Entretanto, seus efeitos são drásticos ao meio ambiente. A mineração causa grande impacto, devido a movimentação profunda de camadas do solo, retirada da vegetação e alteração do regime de escoamento de água. O grande problema da extração de minerais é que estes encontram-se em camadas heterogêneas, em veios ou misturados a minerais sem valor econômico. Isto implica na necessidade de excessiva remoção de terra, gerando um grande volume inconsolidado, suscetível a erosão;

- Urbanização: a construção e expansão de uma cidade causa inúmeras consequências sobre o equilíbrio do meio ambiente. Os principais problemas decorrentes são: desestruturações da topografia e da hidrologia local, produção de sedimentos ocasionadas pelos vários tipos de erosão (superficiais, voçorocamentos, desmoronamentos e deslizamentos), contaminação dos mananciais por resíduos e deposição de entulhos. É muito comum que as cidades tenham se desenvolvido e expandido nas melhores terras agrícolas pelas simples tendências das cidades crescerem em vales e platôs, especialmente perto de rios onde o solo é melhor. Com o passar do tempo outro problema decorrente da urbanização é a incapacidade de suportar os níveis de resíduos produzidos pelos grandes centros urbanos. Seu caráter insustentável, causa nos centros urbanos, a contaminação do solo e dos mananciais pelo lixo e dejetos, urbano e industrial.

Para Fullen e Catt (2004), diversos são os fatores causadores da degradação dos solos, atuando de forma direta, ou indireta. Mas quase sempre, a grande maioria das terras degradadas inicia esse processo com o desmatamento, que pode ser seguido por diversas formas de ocupação desordenada, como: corte de taludes para construção de casas, rodovias e ferrovias, agricultura, com uso da queimada, vários tipos de mineração, irrigação excessiva, crescimento desordenado das cidades, superpastoreio, uso do solo para diversos tipos de despejos industriais e domésticos, sem tratamento da área que recebe esses despejos, enfim, de uma forma ou de outra, os solos tornam-se degradados, sendo muitas vezes, difícil, ou quase impossível a sua recuperação.

Segundo Fullen e Catt (2004), a degradação dos solos cobre uma série de processos complexos, que incluem a erosão (tanto pela água como pelo vento), a expansão das condições ligadas aos desertos (chamada de desertificação), os movimentos de massa, a contaminação dos solos, como por exemplo, a acidificação e a salinização.

3.3 Erosão

Para Mitra et al. (1998), a erosão dos solos é um dos maiores problemas ambientais do mundo, pois afeta em longo prazo a produtividade da terra, e também contribui para a degradação da qualidade das águas pela adição de sedimentos, nutrientes, pesticidas e aumenta a turbidez. Já Brady (1989), enfatizou que nenhum outro fenômeno do solo é mais destrutivo em âmbito mundial do que a erosão, pois abrange perdas de água e de nutrientes minerais essenciais para os vegetais em ritmos muito mais elevados do que ocorrem, mediante lixiviação e, contudo, as partículas de sedimentos removidos podem deslocar-se para corpos hídricos transformando-se em problema de poluição. Segundo Eswaran (2001) a degradação dos solos continuará sendo um grande problema por todo o século 21 por causa do seu impacto na produtividade agrônômica, no meio ambiente, e seu efeito na qualidade de vida.

Para Sobrinho (2015), a erosão e a conservação do solo são desafios que acompanham o homem desde o início da agricultura. Com a evolução da mecanização e do cultivo em áreas extensivas a magnitude da destruição da natureza e da contaminação da água evoluiu proporcionalmente. A erosão do solo afeta a vida de diversas formas. As perdas de solo pela erosão afetam todo um povo, porém, principalmente o lavrador. O Brasil perde, por erosão laminar, cerca de quinhentos milhões de toneladas de terra anualmente; esse prejuízo lento e continuado que a erosão do solo tem ocasionado a nossa economia vem repercutindo, já de maneira nítida e insofismável, a fisionomia depauperada de algumas de nossas regiões.

De acordo com Hasset e Babwart (1992) a erosão causada pela ação da água é a mais comum forma de erosão e de maior distribuição espacial na superfície terrestre. Ela possui duas fases básicas: a primeira é a remoção (*detachment*) de partículas, que pode também formar crostas no topo do solo, e a segunda é o transporte dessas partículas na superfície. Entretanto, o transporte de material pode também ser feito em sub-superfície, através da formação de dutos (*pipes*), com diâmetros que podem variar de poucos centímetros até vários metros. O material que está acima desses dutos pode sofrer o colapso do teto, dando origem a voçorocas.

Segundo Guerra (2009a e 2009b) o escoamento difuso, sob a forma de um lençol (*sheetflow*), pode evoluir para uma ravina. Para chegar a esse estágio, o fluxo de água passa a ser linear (*flowline*) e depois evolui para microrravinas (*micro-rills*), e depois para microrravinas com cabeceiras (*headcuts*). Ao mesmo tempo em que essa evolução vai ocorrendo, podem também se estabelecer bifurcações, através dos pontos de ruptura (*knickpoints*) das ravinas e ser então criada uma verdadeira rede de ravinas (*rill network*) na encosta.

Ainda segundo Guerra (2012), a combinação dos processos de erosão em lençol, ravina e voçoroca, além de rebaixarem a superfície do terreno, provocam a redução do teor de matéria orgânica e de elementos minerais, que podem dificultar, ou mesmo impedir, a agricultura nessas áreas. Os solos, além de passarem pelos processos de erosão, tornam-se degradados, podendo contribuir para a desertificação.

3.4. Fatores que influenciam na degradação do solo

A erosão e consequente degradação está associada a uma série de fatores como climatologia, estrutura dos solos (pedologia, geomorfologia e geologia) cobertura vegetal, topografia (altitude e relevo), tipos de uso do solo. Segundo Araújo et al. (2005), diversos são os fatores associados às causas de degradação dos solos, podendo ser categorizados como fatores facilitadores (desmatamento, superpastoreio, topografia, textura do solo) e fatores diretos (uso de máquinas, drenagem insuficiente, chuvas fortes). O presente trabalho utilizou-se de informações a respeito da declividade, altitude, geomorfologia, pedologia, geologia, uso e cobertura do solo, índice de vegetação, pluviometria. Estas informações foram as mesmas utilizadas por diversos autores em seus estudos envolvendo temática semelhante, como: Lee (2007); Crepani et al. (2011); Pourghasemi et al. (2012); Balamurugan et al. (2016); Haidara et al. (2019); Roy e Saha (2019).

3.4.1 Uso e cobertura do solo

Para Jaiswal et al. (2010), o uso e cobertura da terra desempenham um papel importante e influenciam na erosão e deslizamentos de terra em terreno acidentado. O padrão de uso da terra muda, como desmatamento, ou aumento na agricultura e atividades de construção, que perturbam e modificam a área. Segundo Zhongming et. al. (2010), a cobertura vegetal é um importante parâmetro utilizado para avaliar a relação entre vegetação e erosão do solo. Em geral, a erosão do solo diminui com um aumento na cobertura de vegetação. Mohammad e Adam (2010) indicam que vários estudos em diferentes condições ambientais têm demonstrado o efeito positivo da cobertura vegetal na redução da erosão hídrica e, ainda segundo esses autores, a vegetação controla a erosão do solo por meio de sua copa, raízes, e componentes da camada da serrapilheira

Segundo Matsushita et al. (2007), o índice de vegetação, é definido como a combinação aritmética de duas ou mais bandas relacionadas com as características espectrais da vegetação, tem sido amplamente utilizada para o monitoramento fenológico, classificação da vegetação e

derivação biofísica da vegetação e parâmetros radiométricos e estruturais. Neste trabalho o índice de vegetação utilizado será o *Enhanced Vegetation Index*, o Índice Aprimorado de Vegetação, que será devidamente discutido adiante.

3.4.2. Geomorfologia

Segundo Crepani et al. (2011), a geomorfologia oferece, para a caracterização da estabilidade das unidades de paisagem natural, as informações relativas à morfometria, que influenciam de maneira marcante os processos ecodinâmicos. As informações morfométricas utilizadas são: a amplitude de relevo, a declividade e o grau de dissecação da unidade de paisagem. Essas informações, relacionadas a forma de relevo da unidade de paisagem natural, permitem que se quantifique empiricamente a energia potencial disponível para o escoamento superficial. De acordo com Ercanoglu e Gokceoglu (2004), o gradiente de declividade mede a taxa de mudança de elevação na direção da descida do relevo. A inclinação é um fator importante, que pode alterar a velocidade dos fluxos de superfície e subsuperfície. Segundo Haidara et al. (2019) quanto mais inclinada é a declividade, maior é o risco de erosão do solo. Para Jaafari et al. (2014), o aspecto do declive determina o tipo de vegetação, duração da luz solar, umidade, evaporação, transpiração e também afeta o processo de erosão do solo.

3.4.3. Geologia

Para Crepani et al. (2011), a geologia contribui para a análise e definição da categoria morfodinâmica da unidade de paisagem natural, compreende as informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra, e as informações relativas ao grau de coesão das rochas que a compõem. Por grau de coesão das rochas entende-se a intensidade da ligação entre os minerais ou partículas que as constituem.

3.4.4. Pluviometria

De acordo com Guerra (2005), a quantidade de água proveniente de eventos de chuva é considerada como um dos principais agentes causadores da erosão dos solos, não apenas por causarem a saturação dos solos, mas também pelo papel do *Splash*, um fenômeno que prepara as partículas que compõem o solo para serem transportadas pelo escoamento superficial. Essa preparação se dá tanto pela ruptura dos agregados, quebrando-os em tamanhos menores, como pela própria ação transportadora que o salpicamento provoca nas partículas dos solos. Para

Morgan (2005), os processos de erosão pela água estão intimamente relacionados com os caminhos tomados pela água, no seu movimento através da cobertura e ao longo da superfície do solo. Durante uma tempestade, parte da água cai diretamente na terra, quer porque não há vegetação ou porque ela passa através de aberturas entre as copas das árvores. Parte da chuva é interceptada pela copa, de onde ou retorna para a atmosfera por evaporação ou encontra seu caminho para o solo por gotejamento das folhas, ou descendo os caules das plantas escoando pelo tronco.

Os dados pluviométricos são de fundamental importância para o cálculo de parâmetros como a erosividade, que é a capacidade erosiva da chuva. O potencial de causar erosão de uma chuva está relacionada a energia cinética da mesma. Para uma abordagem mais completa são necessários dados de intensidade, duração e frequência das chuvas, porem de acordo com Gonçalves et al. (2006) em várias regiões do Brasil os índices de erosividade vêm sendo utilizados no traçado de mapas de linhas isoerosivas. A obtenção dessas linhas é uma alternativa para contornar a escassez de dados que possibilitem a determinação dos índices de erosividade em localidades que carecem de tais informações.

3.4.5. Erodibilidade

Segundo Silva et al. (2009), a erodibilidade do solo, consiste na suscetibilidade do solo à erosão hídrica. É um atributo intrínseco de cada solo e constitui um fator fundamental para a previsão de perdas de solo e planejamento do uso da terra. Entre os atributos do solo que, de forma integrada, afetam a erodibilidade, destacam-se a permeabilidade do solo à água, a capacidade de armazenamento de água, a textura (principalmente os teores de silte), a coesão, o grau e o tipo de estrutura, Carbono orgânico, os teores de óxidos de Ferro e de Alumínio, e a tipo de mineral de argila.

De acordo com Mannigel et al. (2002) a avaliações experimentais do valor do fator erodibilidade (K), conforme as normas estabelecidas pela equação universal de perda de solo, além de demandarem excessivos gastos também exigem muito tempo nas suas determinações, uma vez que trabalham com o processo direto da causa e efeito, que é o fenômeno da erosão do solo. Tais motivos tornaram necessária a estimativa da erodibilidade por outros meios mais fáceis, denominados métodos indiretos de determinação da erodibilidade. Neste trabalho, os dados que representam a erodibilidade do solo foram gerados a partir dos dados vetoriais que representam as linhas de drenagem da hidrografia do estado de Sergipe. Foram realizadas análises qualitativa e quantitativa da densidade da rede de drenagem.

A relação entre a densidade de drenagem e a permeabilidade é inversamente proporcional. Desta forma, a maior densidade de drenagem representa a maior impermeabilidade da superfície do terreno, ocasionando o maior escoamento superficial. Consequentemente maior é a erodibilidade da rocha/solo (erosão laminar e/ou erosão linear), causando o assoreamento dos cursos e reservatórios d'água pela deposição dos sedimentos (NASCIMENTO; PETTA, 2008).

3.4.6. Pedologia

De acordo com Crepani et al. (2001) a pedologia participa da caracterização morfodinâmica das unidades de paisagem natural fornecendo o indicador básico da posição ocupada pela unidade dentro da escala gradativa da Ecodinâmica: a maturidade dos solos. A maturidade dos solos, produto direto do balanço morfogênese/pedogênese, indica claramente se prevalecem os processos erosivos da morfogênese que geram solos jovens, pouco desenvolvidos, ou se, no outro extremo, as condições de estabilidade permitem o predomínio dos processos de pedogênese gerando solos maduros, lixiviados e bem desenvolvidos.

3.5. Geotecnologias

Miranda (2005) ressalta que as geotecnologias existentes possibilitam a aquisição e manipulação de informações espaciais, sendo ferramentas relevantes para o levantamento, monitoramento e mapeamento dos recursos naturais.

De acordo com Rosa e Brito (1996) existe uma gama de fontes de dados espaciais disponíveis na internet e as tecnologias do geoprocessamento, tais como o sensoriamento remoto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), a cartografia digital, os Sistemas de Posicionamento Global (GPS), os quais permitem integrar dados georreferenciados, são apenas alguns exemplos do uso das geotecnologias como auxílio no processo de gestão territorial em aplicações diversas nos mais variados campos das ciências naturais

Para Flauzino et al. (2010) a utilização das geotecnologias se torna um instrumento de grande potencial para o estabelecimento de planos integrados de conservação do solo e da água. Destaca-se a utilização dos SIG como ferramenta para mapear e obter respostas às várias questões sobre planejamento urbano e levantamento do meio físico, ao descrever os mecanismos das mudanças que operam no meio ambiente, além de auxiliar o planejamento e manejo dos recursos naturais existentes.

3.5.1. Geoprocessamento

O geoprocessamento é o conceito mais abrangente e representa qualquer tipo de processamento de dados georreferenciados, enquanto um SIG processa dados gráficos e não gráficos (alfanuméricos) com ênfase em análises espaciais e modelagens de superfícies (BURROUGH, 1987).

Segundo Câmara et al. (2001) o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica e que vem influenciando de maneira crescente as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados, tornam ainda possível automatizar a produção de documentos cartográficos.

De acordo Rosa e Brito (1996), o geoprocessamento envolve pelo menos quatro categorias de técnicas relacionadas ao tratamento da informação espacial:

- Técnicas para coleta de informação espacial (cartografia, sensoriamento remoto, GPS, topografia, levantamento de dados alfanuméricos);
- Técnicas de armazenamento de informação espacial (bancos de dados – orientado a objetos, relacional, hierárquico etc.);
- Técnicas para tratamento e análise de informação espacial (modelagem de dados, geoestatística, aritmética lógica, funções topológicas, redes etc.);
- Técnicas para o uso integrado de informação espacial, como os sistemas GIS – *Geographic Information Systems*, LIS – *Land Information Systems*, AM/FM – *Automated Mapping/Facilities Management*, CADD – *Computer-Aided Drafting and Design*.

3.5.2. Sensoriamento Remoto

Segundo Gomes et al. (2020), o sensoriamento remoto é uma técnica que obtém dados da superfície terrestre por meio da captação e registro em imagem da energia refletida/emitida pela superfície, sem que haja contato físico entre o sensor e o alvo estudado. A imagem é analisada a partir do comportamento espectral que os objetos em estudo apresentam em cada comprimento de onda.

Segundo Menezes e Almeida (2012), sensoriamento remoto é uma ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres.

O Sensoriamento Remoto agrega tecnologias de sensores imageadores e também não imageadores. Sensores portáteis não imageadores, ou espectrorradiômetros, realizam densa amostragem do espectro eletromagnético (com milhares de bandas espectrais de largura nanométrica), abrangendo os comprimentos de onda do visível (VIS), do infravermelho próximo (NIR), do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e do infravermelho termal (TIR).

As imagens obtidas através do sensoriamento remoto proporcionam uma visão de conjunto multitemporal de extensas áreas da superfície terrestre. Esta visão sinóptica do meio ambiente ou da paisagem possibilita estudos regionais e integrados, envolvendo vários campos do conhecimento. Elas mostram os ambientes e a sua transformação, destacam os impactos causados por fenômenos naturais como as inundações e a erosão do solo (frequentemente agravados pela intervenção do homem) e antrópicos, como os desmatamentos, as queimadas, a expansão urbana, ou outras alterações do uso e da ocupação da terra (FLORENZANO, 2002).

É muito grande e diversificada a quantidade de dados e produtos advindos do sensoriamento remoto, que vem sendo largamente utilizadas devido sua gratuidade e difusão pela internet, como por exemplo as imagens do *Landsat*, do Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS do inglês *China-Brazil Earth-Resources Satellite*), SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e os dados do sensor MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo dos satélites Terra e Aqua.

3.6. Lógica Fuzzy

Zadeh (1965) foi o primeiro a introduzir a teoria dos conjuntos *fuzzy* para analisar matematicamente processos naturais ou fenômenos não discretos. De acordo com Vieira et al. (2014), a Lógica *Fuzzy* é uma técnica muito útil na solução de problema com extensa aplicabilidade. É usada atualmente nas áreas de negócios, sistemas de controle, eletrônica e engenharia de tráfego, meteorologia, entre outras aplicações. A técnica pode ser usada para gerar soluções para os problemas com base em informações vagas, ambíguas, incompletas ou imprecisas. Segundo Zimmerman (1996), um conjunto *fuzzy* é uma classe de objetos com um grau contínuo de pertinência em relação ao conjunto, caracterizado por uma função de pertinência que relaciona cada objeto a um grau de pertinência variando de 0 a 1.

Segundo Vieira et al. (2014), um sistema *Fuzzy* é uma função de R^n em R , construída por uma metodologia específica de acordo com 3 módulos, como pode ser visto na Figura 2. O primeiro módulo é o de fuzzificação: modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos fuzzy. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista no processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos linguísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo linguístico, deve ser associado a um conjunto fuzzy por uma função de pertinência. É nesse módulo que se armazenam as variáveis e suas classificações linguísticas;

O segundo módulo é o de inferência: é onde se definem os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação fuzzy que modela a base de regras. É deste módulo que depende o sucesso do sistema *Fuzzy* já que ele fornecerá a saída (controle) *fuzzy* a ser adotado pelo controlador a partir de cada entrada *fuzzy*. O terceiro módulo é o de defuzzificação: que traduz o estado da variável de saída fuzzy para um valor numérico.

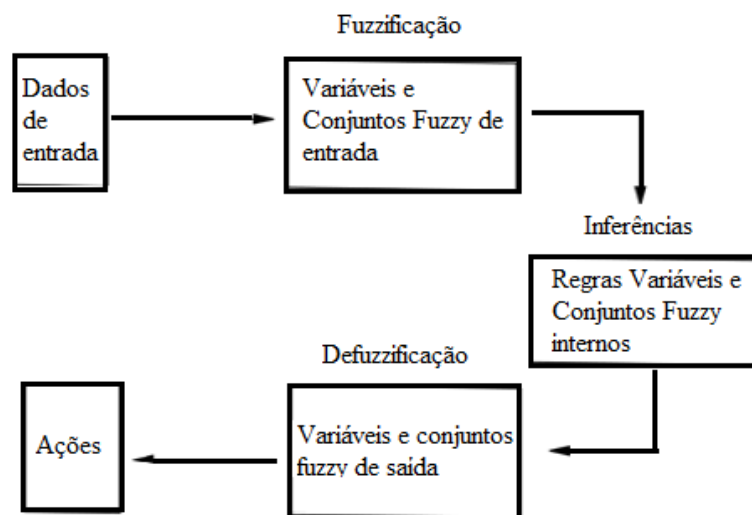


Figura 2 - Estrutura de um controlador de lógica fuzzy. Adaptado de Vieira et al. (2014).

Como já foi mencionado, o uso da lógica fuzzy se faz presente em diversas áreas e estudos. Da Silva et al. (2007), aplicou a teoria dos conjuntos fuzzy em um estudo com o objetivo de unificar informações climáticas de consenso subjetivos usadas na previsão climática da Região Semi-Árida do Nordeste do Brasil RSANEB, visando obter a previsão determinística de um Índice Regional da Quadra Chuvosa (IRCQC); Vieira (2015), elaborou e validou um modelo linguístico *fuzzy* para previsão de hospitalização por doenças respiratórias; Rezende et al. (2016), construíram um Sistema Lógico *Fuzzy* para avaliar o conforto ambiental de espaços educacionais; Scremin et al. (2018), adequaram o modelo de lógica fuzzy para simulação da produção de grãos de aveia nas condições de fornecimento de nitrogênio na base e cobertura

junto à ação combinada de temperatura do ar, precipitação pluviométrica e soma térmica, em condições reais de cultivo; Silva et al. (2020), aplicaram um modelo que usou a lógica dos conjuntos difusos (lógica fuzzy) para prever os cenários com diferentes condições climáticas e sanitárias observadas no município de Quixadá – CE para prever ocorrências de arboviroses como a Dengue e Chikungunya.

O método de lógica fuzzy permite combinações ponderadas de mapas e pode ser rapidamente implementado em softwares de ambiente SIG (Pradhan, 2010). De acordo com Sema et al. (2017), os valores 0 e 1 representam a mínima e a máxima influência de um fator particular para um determinado fenômeno. Segundo Lee (2007), em mapas, o atributo de interesse é geralmente medido em intervalos discretos e a função de pertinência pode ser expressa como uma tabela relacionando as classes do mapa aos valores de pertinência das classes em relação ao fenômeno estudado. Pourghasemi et al. (2012) afirmam que a lógica *fuzzy* é objetiva e direta de se entender e implementar. Esse método permite a utilização de dados em qualquer escala de medida e as ponderações dos atributos é controlada inteiramente pelo pesquisador.

Sema et al. (2017) afirmam que diferentes operadores podem ser empregados para combinar os valores de associação de dois ou mais mapas temáticos a partir de uma função *fuzzy*. Bonham e Carter (1994) descreveram cinco operadores *fuzzy*: *Fuzzy “and”*; *Fuzzy “or”*; Produto algébrico; Soma algébrica e Operador *Fuzzy Gamma* (OFG). O *fuzzy “and”* é equivalente a operação Booleana AND (interseção) e os valores de associação resultantes, são controlados pelos valores mínimos de dentre os dados usados como entrada. O *fuzzy “or”* é equivalente ao Booleano OR (união). Neste caso os valores de associação resultantes, são controlados pelos valores máximos de determinado mapa entre os dados usados como entrada. O produto algébrico é definido como o produto dos valores resultantes das funções de pertinência dos n conjuntos fuzzy a serem combinados. A soma algébrica é o complemento matemático do produto algébrico.

São inúmeras as dificuldades para se obter precisamente o potencial de degradação dos solos através de modelos empíricos. França et al. (2005), aponta que essas dificuldades são decorrentes de fatores como: necessidade de um grande volume de dados, alguns deles de difícil obtenção; os modelos são geralmente desenvolvidos para regiões diferentes daquelas nas quais são aplicados; na maioria das vezes são criados para escalas nas quais diferentes interações e processos podem ser importantes.

Frente a essas dificuldades a lógica *fuzzy* vem sendo utilizada em diversos estudos e modelos envolvendo o potencial de erosão dos solos. Cohen et. al. (2008) desenvolveram um

modelo baseado na lógica *fuzzy* para aferir o potencial de erosão dos solos (*fuzzy*-based dynamic soil erosion model – FuDSEM). Lobão et. al. (2006) avaliaram a vulnerabilidade natural à erosão do solo no município de Morro do Chapéu-BA, a partir do modelamento das variáveis, geologia, geomorfologia, solo, clima, vegetação e uso do solo. França et. al. (2005) propuseram uma metodologia para estimar a distribuição espacial de classes de potencial à erosão fazendo-se uso dos conceitos de lógica *fuzzy* em um modelo que se diferencia pelo número reduzido de variáveis, pois utiliza somente duas provenientes dos mapas de declividade e de cobertura do solo.

4. MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Área de Estudo

A área que foi utilizada para a realização desse estudo será o estado de Sergipe. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE, 2020), o estado de Sergipe possui uma área territorial de 21.926,908 km² e uma população estimada para o ano de 2019 de 2.298.696 habitantes. A Figura 3 apresenta um mapa de localização do estado de Sergipe e seus municípios.

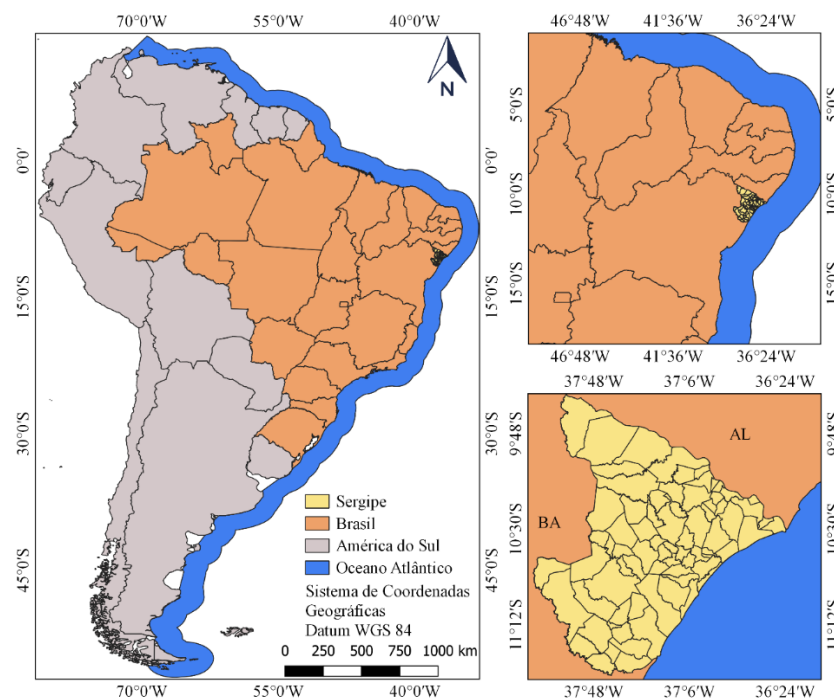


Figura 3 - Mapa de localização do estado de Sergipe. Fonte: elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).

4.1.1. Clima

Para Mendonça e Danni-Oliveira (2007), o estado do Sergipe tem seu clima classificado como tropical litorâneo do Nordeste Oriental, que varia bastante na quantidade de meses secos durante o ano, mesmo em um estado de pequena expressão geográfica, já que é o menor da federação. De acordo com Diniz et al. (2014), o regime pluviométrico se distribui de forma decrescente do litoral para o interior do estado. O litoral, mais a sudeste, apresenta de 0 a 2 meses secos, enquanto o noroeste do estado apresenta de 7 a 8 meses secos. Os principais tipos climáticos do estado ocorrem respectivamente do litoral mais a sudeste para o interior mais a noroeste são: clima úmido (de 0 a 2 meses secos) atuam especialmente na zona da mata sergipana, na faixa dos tabuleiros; o clima subúmido de transição para o semiárido (de 3 a 4; e de 5 a 6 meses secos) no Agreste; e o semiárido (de 7 a 8 meses secos) na porção interiorana onde ocorrem áreas de pediplano sertanejo e serras residuais (MENDONÇA & DANNI-OLIVEIRA, 2007).

De acordo com Molion e Bernardo (2002), os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no nordeste brasileiro podem ser classificados em mecanismos de grande escala, mesoescala e microescala, sendo os primeiros responsáveis pela maior parte da precipitação observada. Diniz et al. (2014), afirmam que dentre os mecanismos de grande escala, destacam-se a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e dos sistemas frontais ou frentes frias. Perturbações Ondulatórias no Campo dos Ventos Alísios (POA), brisas marinhas e terrestres fazem parte da mesoescala, ao passo que as circulações orográficas são exemplos de mecanismos de microescala. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um dos principais sistemas responsáveis por precipitação pluviométrica nas baixas latitudes no território brasileiro.

Segundo Melo et al. (2009), em relação ao Atlântico Equatorial, a ZCIT migra sazonalmente de sua posição mais ao norte, próximo aos 14°N (agosto-setembro), para a sua posição mais ao sul aproximadamente aos 2°S (março-abril). As autoras afirmam que “em anos chuvosos, a ZCIT pode atingir até 5°S, perto da costa nordestina”. É importante ressaltar que essas posições tratam do centro de atuação do sistema, em especial de sua banda principal, podendo ocorrer uma banda secundária no Hemisfério Sul (HS), precipitações ocasionadas na margem desse sistema no Nordeste Setentrional são percebidas com grande frequência no Sertão Pernambucano e a sul do Ceará, por exemplo; portanto, após os 8°S há áreas que recebem precipitação da citada banda secundária.

Costa e Santos (2011) afirmam que precipitações associadas à ZCIT chegam a atingir o estado do Sergipe. É possível perceber que a banda secundária chega a atingir o norte da Bahia. A ZCIT tem, portanto, uma participação secundária nos totais de precipitação de Sergipe, dado que sua banda secundária não atua em todos os anos, apenas nos mais chuvosos; assim, há anos em que o sistema não chega a atingir o estado sergipano (Diniz et al., 2014).

Em relação as massas de ar, segundo Diniz et al. (2014) as principais massas responsáveis por precipitações pluviométricas no estado de Sergipe são a Massa Equatorial do Atlântico Sul (MEAS), que atua mais a noroeste do estado; a Massa Polar Atlântica (MPA) e a Massa Tropical Atlântica (MTA), que atuam prioritariamente no restante do estado e são bastante influenciadas pela continentalidade. A MPA se origina nas altas polares e é atraída pelas baixas equatoriais, rumo ao Equador pela faixa leste do Brasil. Apesar de originariamente essa massa ser fria e seca, ganha umidade e perde temperatura em seu trajeto às menores latitudes, ela produz chuvas no litoral brasileiro entre finais de verão e inverno e sua atuação diminui bastante à medida que se afasta da costa (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). Além disso, a MTA é uma das principais massas de ar, fato que auxilia na compreensão da dinâmica atmosférica do Brasil, onde há considerável influência na definição dos tipos climáticos; origina-se no centro de altas pressões subtropicais de altas pressões do

Atlântico e apresenta, portanto, características de temperatura e umidade elevadas. Também é atraída por baixas pressões continentais, abastecendo o continente com umidade e calor; atua durante o ano inteiro sobre o Brasil, especialmente no verão e nas faixas litorâneas, à medida que rumo para o interior perde muito de sua umidade (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007).

A Figura 4 apresenta a divisão climática do estado de Sergipe de acordo com dados georreferenciados da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMARH-SE, 2010).

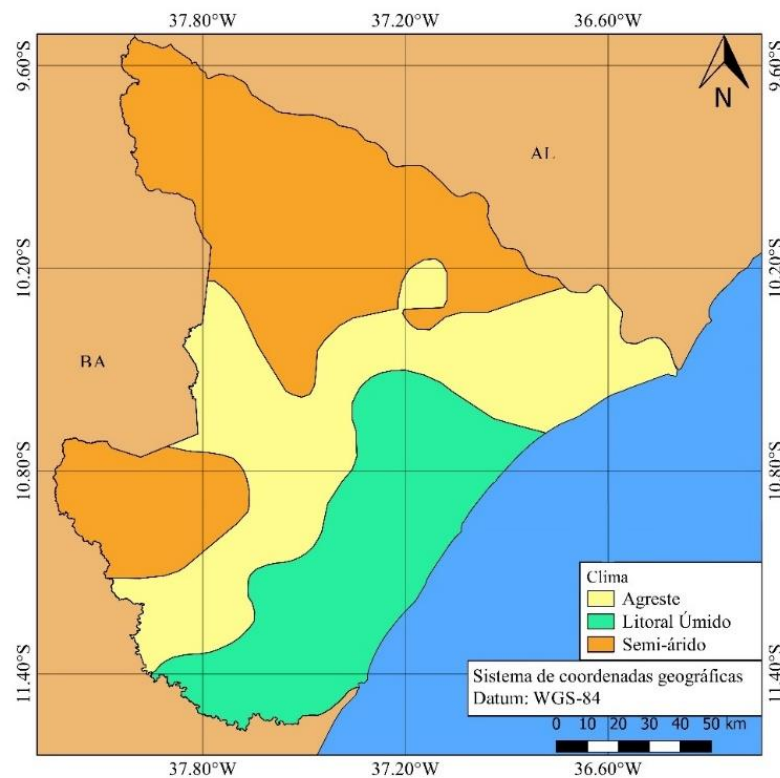


Figura 4 - Mapa de divisão climática do estado de Sergipe. Fonte: elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMARH/SRH, 2014).

Em Relação aos volumes médios de precipitação anual, segundos os dados do Atlas Digital de Recursos Hídricos da SEMARH, as zonas climáticas do estado de Sergipe apresentam as seguintes características:

- Semiárido: Caracteriza-se por grande deficiência hídrica. As precipitações anuais raramente se situam entre 600 e 880 mm, sofrendo muita variabilidade, com dois ou três meses favoráveis às atividades agrícolas;
- Agreste: precipitações entre 880 e 1160 mm anuais, chegando a ultrapassar os 1.200 mm/ano. Nesta zona, verifica-se a acentuada expansão da pecuária;
- Litoral úmido: Faixa litorânea que apresenta em sua grande parte volumes entre 1440 e 1720 mm.

A Figura 5 apresenta um mapa com as isoietas de precipitação para o estado de Sergipe.

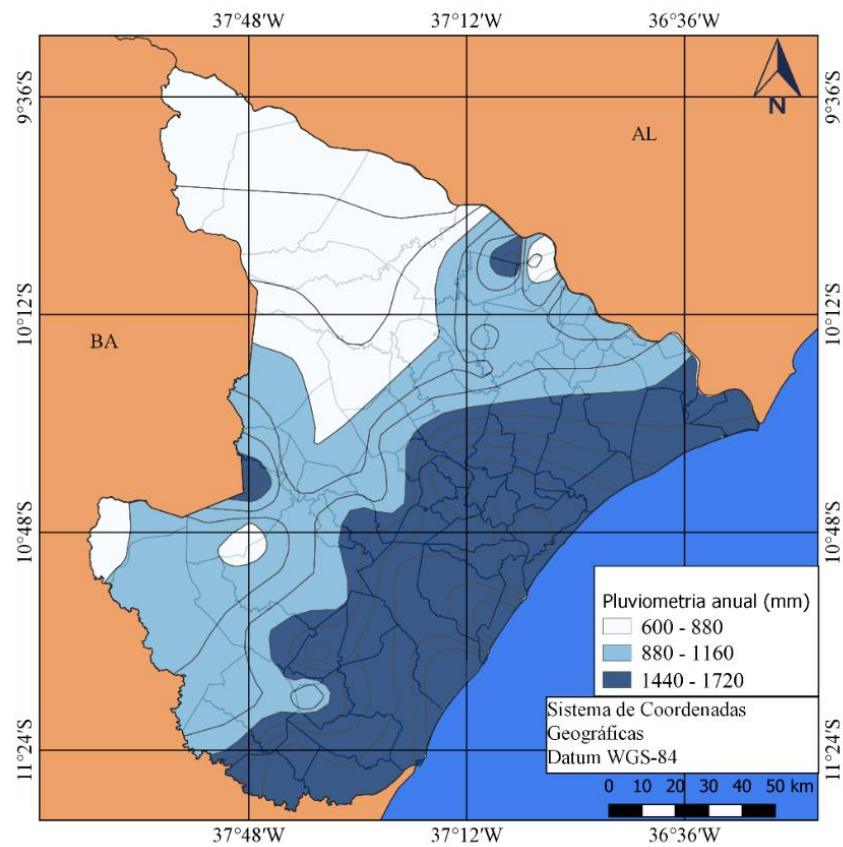


Figura 5 - Mapa de isoietas de precipitação para o estado de Sergipe: Fonte: adaptado e elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).

A Figura 6, apresenta um mapa do estado de Sergipe com sua divisão por municípios e por territórios, além da centralidade das sedes municipais dos principais municípios de cada território.

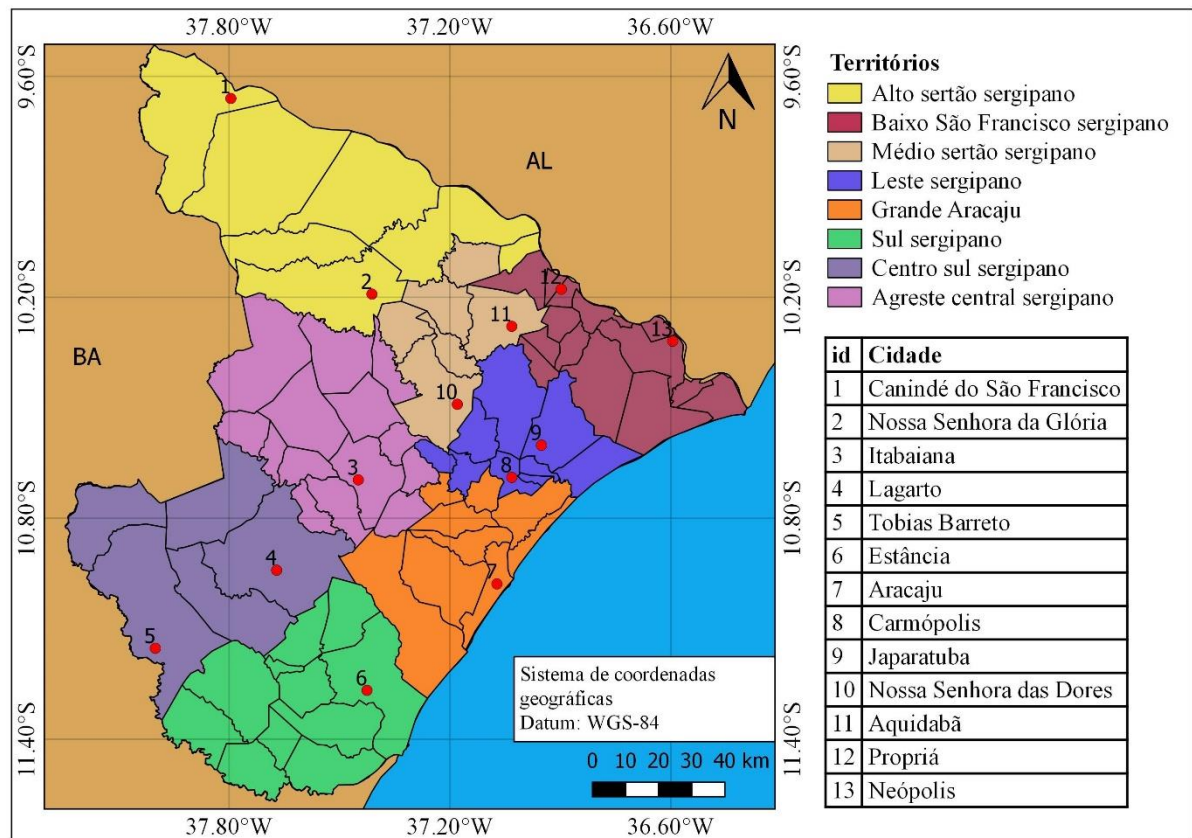


Figura 6 - Mapa dos territórios do estado de Sergipe: Fonte: adaptado e elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).

4.1.2. Biomas

De acordo com o Serviço Florestal Brasileiro (SFB), em seu Inventário Florestal Nacional de 2017, no estado de Sergipe estão presentes os biomas Caatinga e Mata Atlântica. Deste modo, observa-se que a maior parte da área ocupada por florestas no estado compreende áreas de contato entre diferentes tipos de vegetação, sendo frequente principalmente o contato entre a Savana Estépica e a Floresta Estacional. A Figura 7 apresenta a divisão dos biomas presentes no estado de Sergipe, os dados são provenientes do Atlas Digital de Recursos Hídricos da SEMARH-SE (2014).

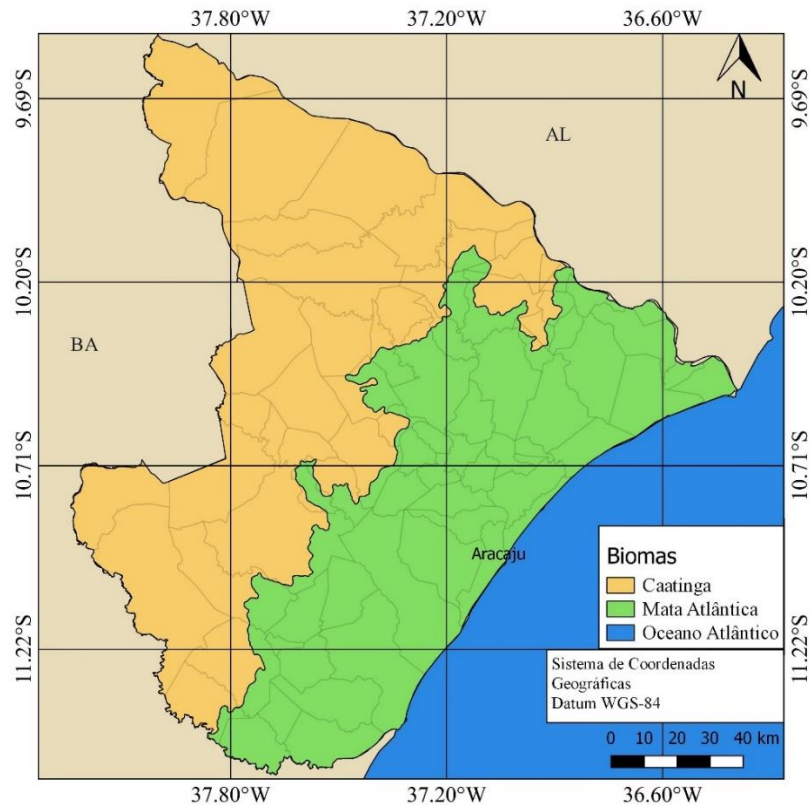


Figura 7 - Mapa da divisão dos biomas do estado de Sergipe. Fonte: elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).

4.1.3. Geologia

Segundo Almeida et al. (1977) o estado de Sergipe está localizado na região limítrofe de três províncias estruturais definidas como: Província São Francisco, a Província Borborema e a Província Costeira. Os principais domínios geológicos do estado de Sergipe são: Poço Redondo, Marancó, Macururé, Canindé, Vaza Barris e Estância.

De acordo com D'el-Rey Silva (1995), o Domínio Poço Redondo é um fragmento crustal constituído por migmatitos tonalíticos e paragnaisses, e com intrusões de três tipos de granitoides (Serra Negra, Sítios Novos e Xingó), ocorrendo imediatamente a norte das rochas vulcanossedimentares do Marancó, limitados através de zona de cisalhamento contraccional. São metamorfisados em fácies xisto verde, em sua parte sul e anfibolito, em sua porção norte (Silva FILHO e TORRES, 2002).

O Domínio Macururé é representado pelas rochas do Grupo Macururé, sendo constituído por mica-xistos granatíferos, metarritmitos, quartzitos, calcissilicáticas, paragnaisses e um número significativo de granitos que intrude o domínio (OLIVEIRA ET AL., 2010).

Ocorre sotoposto ao Grupo Vaza-Barris, tem contato tectônico da Falha de São Miguel do Aleixo, sendo que ao norte faz contato com os domínios Poço Redondo e Marancó através

da Falha Belo Monte - Jeremoabo e com o Domínio Canindé por uma zona de cisalhamento contracional de alto ângulo (D'EL-REY SILVA, 1999).

O Domínio Canindé ocorre no extremo norte do Estado de Sergipe e limita-se com o Domínio Poço Redondo através da zona de cisalhamento Mulungu-Alto Bonito com movimentação sinistral e direção sudeste-noroeste (Oliveira et al., 2010). Souza et al. (2003), afirmam que esse domínio é constituído principalmente por rochas metavulcânicas, diques máficos e félsicos metamorfisados, intercalações de rochas metassedimentares, intrusões graníticas diversas e um complexo gabróico (Suíte Gabróica Canindé).

O Domínio Vaza Barris ocorre imediatamente a norte do Domínio Estância, limitando-se através da zona de cisalhamento rúptil-dúctil contracional de alto ângulo (Falha do Rio Jacaré), a norte é delimitado ao longo das zonas de cisalhamento São Miguel do Aleixo e Nossa Senhora da Glória, de movimentação contracional oblíqua sinistral, prolonga-se para oeste, além do limite estadual, e, para leste, até a Bacia de Sergipe (SANTOS et al., 1998). É composto principalmente por metassedimentos psamo-pelito-carbonáticos de baixo grau metamórfico, xisto verde, subdivididos nos grupos Miaba, Simão Dias e Vaza Barris (SANTOS et al., 1998), depositados em margem continental passiva (D'EL- REY SILVA & MCCLAY, 1995).

De acordo com Dantas (2015) o Domínio Estância é caracterizado por sedimentos plataformais (arenitos, calcário, argilitos e lentes conglomeráticas) indeformados ou pouco deformados, assentados sobre o embasamento. O Grupo Estância é representado pelas formações Acauã, Lagarto e Palmares.

A Figura 8 apresenta a divisão dos principais grupos de formações geológicas do estado de Sergipe, os dados são provenientes do Atlas Digital de Recursos Hídricos da SEMARH-SE (2010).

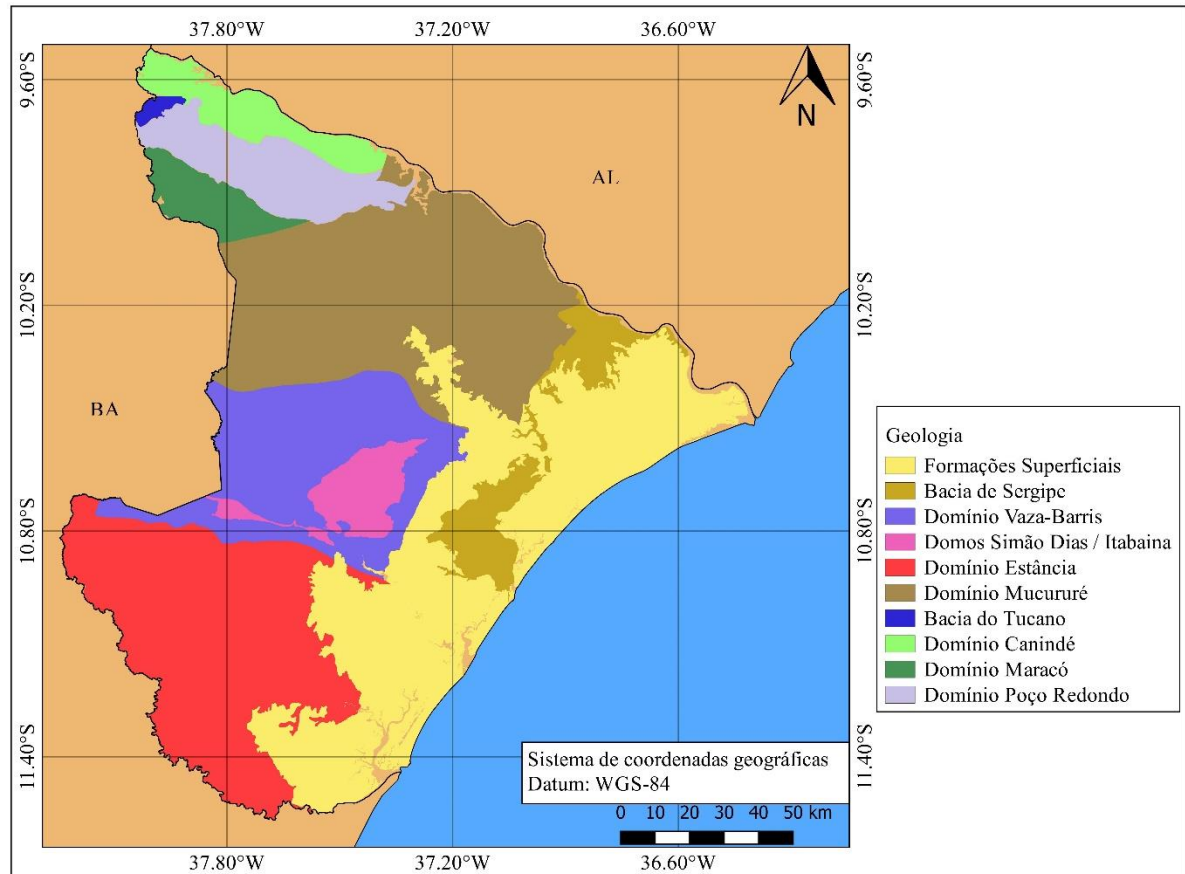


Figura 8 - Mapa de Formações geológicas do estado de Sergipe. Fonte: adaptado e elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).

4.1.4. Geomorfologia

De acordo com o DNIT (2017), o relevo de Sergipe é pouco movimentado, constituído por um modelado suave com áreas planas e altitudes modestas que vão aumentando em direção ao interior, interrompido localmente por elevações denominadas de serras que constituem os pontos mais elevados do Estado. Quanto a compartimentação do relevo, pode-se identificar as seguintes unidades geomorfológicas ou de relevo:

- Planície Costeira: ocorre ao longo de toda faixa costeira e é caracterizada por suas formas planas baixas (praias e restingas) construídas pela deposição de areias e outros materiais retrabalhados pelo mar (Sedimentos de praias e aluviões). As dunas, morros de areia feito pelos ventos, representam as partes mais elevadas desta área, porém sua altitude não ultrapassa trinta metros;
- Tabuleiros Costeiros: ocorrem logo após a planície litorânea em direção ao interior; constituem baixo planalto pré-litorâneo com altitudes em torno de cem

metros. Os Tabuleiros próximos aos rios foram erodidos e escavados, aparecendo morros e colinas, como os observados ao longo das rodovias que ligam Aracaju a Itabaiana, a Maruim e a Itaporanga d'Ajuda;

- Pediplano Sertanejo: aparece no Oeste do Estado, ocupando extensas áreas aplainadas que se elevam gradativamente de 150 a 300 metros, à medida que avança para a divisa com a Bahia. É comum a ocorrência de morros residuais denominados de inselbergs que se destacam na planura generalizada da região. Apesar desse relevo aplainado, destacam-se algumas áreas elevadas como a Serra Negra, no município de Poço Redondo, divisa com a Bahia, com altitude de 750 metros, o ponto culminante do Estado;
- Serras Residuais: situam-se em volta de Itabaiana, no centro do Estado, são representadas pela serra de Itabaiana, segundo ponto mais alto do estado com 659 m de altitude, pela serra da Miaba com 630 metros, terceiro ponto culminante, e ainda pelas serras Comprida, Quizongo, Cajueiro, Capunga e outros;

A Figura 9 apresenta a divisão das unidades geomorfológicas presentes no estado de Sergipe, os dados são provenientes do Atlas Digital de Recursos Hídricos da SEMARH-SE (2010).

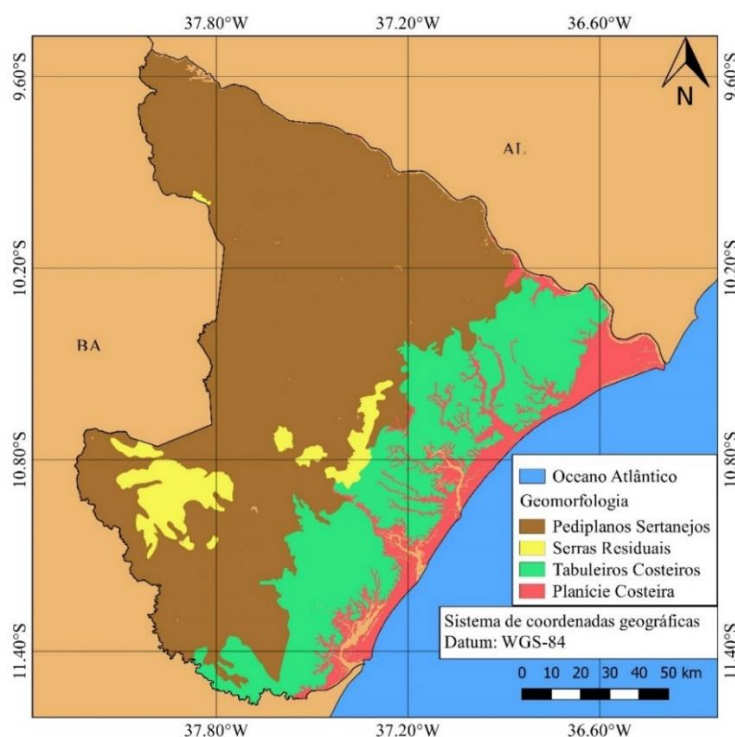


Figura 9 - Mapa de unidades geomorfológicas do estado de Sergipe. Fonte: elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).

4.1.5. Pedologia

Segundo Shinzato et al. (2008), solo é a superfície inconsolidada, constituída de camadas que diferem pela natureza física, química, mineralógica e biológica, desenvolvida ao longo do tempo sob a influência do clima, material originário, relevo e da própria atividade biológica.

Os neossolos quartzarênicos, espodosolos e gleissolos encontram-se associados aos sedimentos inconsolidados e arenitos das planícies e tabuleiros costeiros da região climática da faixa litorânea composta por resquícios de Mata Atlântica e vegetação de mangue e restinga. Os argissolos, latossolos, planossolos, vertissolos, chernossolos e neossolos quartzarênico, flúvico e litólico estão associados às regiões semiárida e agreste constituídas por grande variedade de rochas cristalinas do pediplano sertanejo composto resquícios de Caatinga e vegetação arbórea e arbustiva. Os argissolos e os neossolos quartzarênicos são as tipologias dominantes na área de estudo (ARAGÃO et al., 2011, EMBRAPA, 2014).

A Figura 10 apresenta as classes de solo presentes no estado de Sergipe de acordo com a nomenclatura utilizada no sistema de classificação do solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2006). Os dados são provenientes do Atlas Digital de Recursos Hídricos da SEMARH-SE (2010).

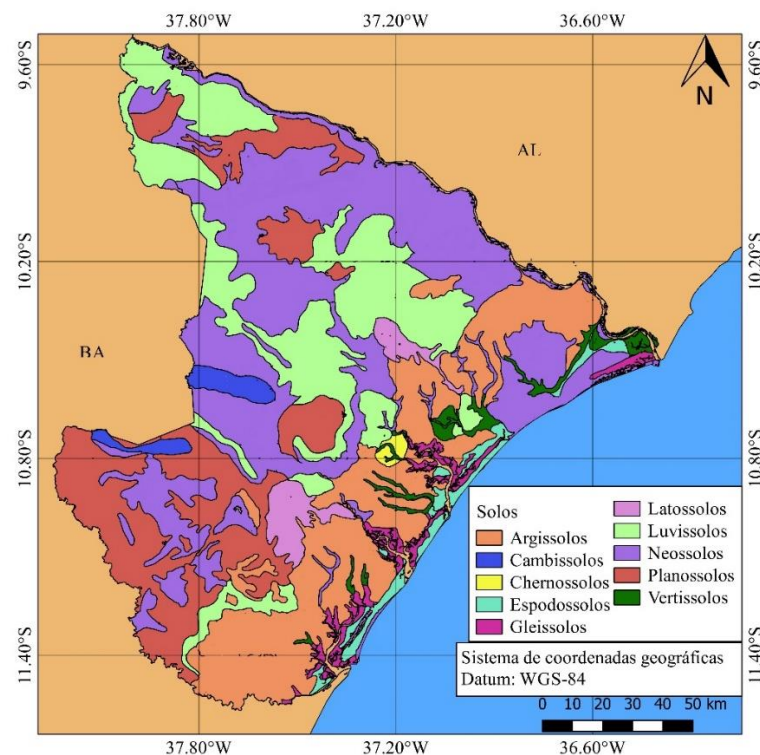


Figura 10 - Mapa das classes de solo do estado de Sergipe. Fonte: adaptado e elaborado a partir do Atlas digital sobre recursos hídricos (SEMAR/SRH, 2014).

4.2. Metodologia

A metodologia proposta neste trabalho se baseia na exploração das relações de causa-efeito do princípio fundamental das relações específicas entre os processos e fatores da degradação dos solos. O potencial de degradação pode ser formulado com a Equação (1) de fator de condição, conforme proposto por Metternicht e Gonzalez (2005):

$$\text{Potencial à degradação} = f(A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n) \quad (1)$$

Em que A_1 , A_2 , A_3 , ..., A_n representam as características (parâmetros) da paisagem que participam na promoção da degradação dos solos.

A construção de um modelo baseado na lógica *fuzzy* passa por algumas etapas fundamentais, como: a definição das variáveis de entrada e de saída; escolha ou não de funções de pertinência para realizar a inferência *fuzzy*, ou seja, transformar os valores para o intervalo de 0 a 1, pois os valores de entrada podem ser computados a partir de funções como a linear, sigmoidal, trapezoidal, triangular ou definidos a partir do conhecimento existente na literatura; escolha do operador *fuzzy*, seja o Fuzzy “and”; Fuzzy “or”, Produto Algébrico, Soma Algébrica ou Operador *Fuzzy Gamma* (OFG).

As equações utilizadas na etapa de inferência *fuzzy* e o operador *fuzzy gamma* foram implementadas a partir do plugin Calculadora *Raster*, do software QGIS (versão 2.18.12). O fluxograma presente na Figura 11 mostra de forma resumida as etapas que foram realizadas durante a produção deste trabalho.

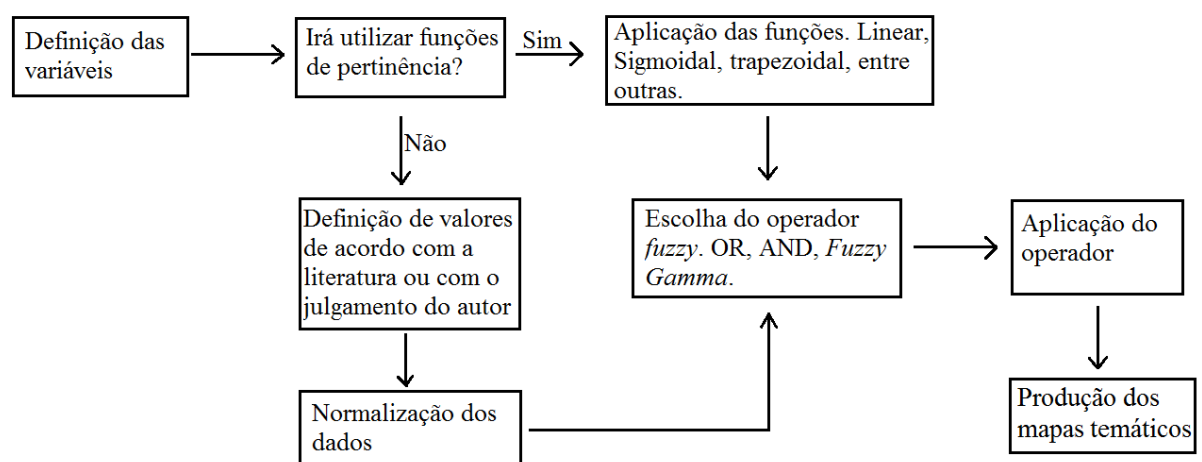


Figura 11 - Fluxograma das etapas para a produção dos mapas do potencial de degradação do solo.

4.2.1. Aquisição e tratamento dos dados

Os dados utilizados neste trabalho foram adquiridos a partir de diferentes plataformas e bancos de dados disponíveis na internet, como: Portal *Earth Data* e Giovanni do MODIS, MapBiomas, TOPODATA e Atlas digital sobre recursos hídricos da SEMARH/SRH. Após adquiridos os dados, utilizou-se de técnicas de geoprocessamento disponíveis no software QGIS para que todas as informações estivessem no mesmo padrão, ou seja, todos em formato matricial (*raster*), com o mesmo limite espacial (o estado de Sergipe), resolução temporal, mesmo Sistema de Referência de Coordenadas (CRS) e *Datum*.

4.2.1.1. Precipitação

Os dados de precipitação são oriundos da *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) e foram adquiridos a partir do aplicativo Giovanni, do portal MODIS. O aplicativo Giovanni foi desenvolvido para fornecer uma maneira simples e intuitiva de visualizar, analisar e acessar dados de sensoriamento remoto das ciências da Terra, incluindo grandes volumes de dados, especialmente de satélites, sendo permitindo realizar o *download* dos dados.

Segundo Wolf et al. (2004) o TRMM é um programa espacial baseado em satélite para medir a precipitação tropical e para ajudar a quantificar a distribuição associada e a transferência de calor latente, que impulsionam o sistema atmosférico global. O TRMM é uma união entre Estados Unidos e Japão (Simpson et al. 1996; Kummerow et al. 1998). Os dados adquiridos para os anos de 2000 e 2019 representam as precipitações médias anuais, possuem resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, sistema de referência de coordenadas geográficas e *Datum World Geodetic System 1984* (WGS-84). O portal Giovanni requer que seja definida uma região de formato retangular para que o download seja realizado, sendo assim, após adquiridos, os dados foram recortados utilizando-se um dado vetorial no formato *shapefile* do limite do estado de Sergipe.

A Figura 12 apresenta mapas temáticos produzidos para os anos de 2000 (Fig. 11a) e 2019 (Fig. 11b). Os volumes de chuva média anual em mm/ano foram divididos em cinco classes.

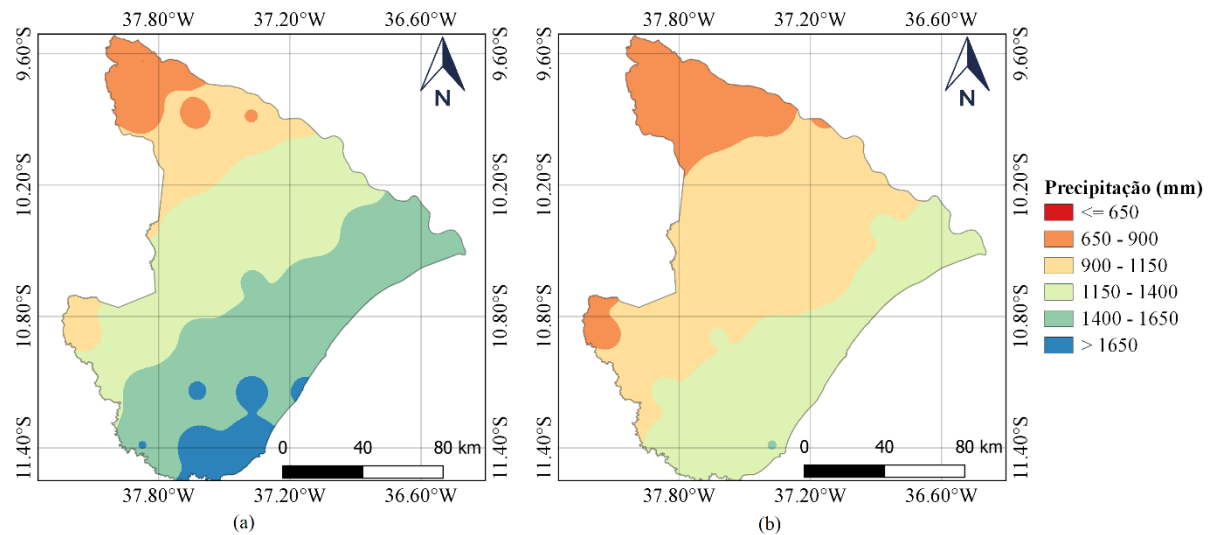


Figura 12 - Mapas de pluviometria média para os anos de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe segundo os dados do TRMM, disponíveis no portal Giovanni.

4.2.1.2. Erodibilidade

Os dados de erodibilidade foram gerados a partir dos dados vetoriais de lineações da rede hidrográfica de Sergipe. Para transformar os dados da rede hidrográfica em um dado matricial (*raster*) utilizou-se da metodologia de Santos e Nascimento (2018).

Primeiramente os dados da rede hidrográfica foram unidos a partir do processo “Mesclar camadas vetoriais” da ferramenta “Gerenciar Dados” do Qgis, pois os mesmos se encontravam divididos em bacias hidrográficas. Em seguida a partir do processo geométrico “Extrair nós” as linhas de drenagem foram transformadas em pontos, onde cada ponto representa um dos vértices presentes nas linhas que formavam a rede de drenagem.

De posse dos dados sob a forma de pontos, a próxima etapa foi a geração do mapa de densidade. Para isso foi utilizado o estimador de densidade kernel da ferramenta “Mapa de calor”. O estimador kernel é um método estatístico de estimação de densidade não-paramétrica ponderada pela distância a um valor central a partir dessa função obtém-se um arquivo matricial com o resultado da soma do empilhamento de “n” outros *rasters* circulares de raio “h” para cada ponto do dado de entrada, de acordo com a Equação (2).

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (2)$$

Em que k é a função kernel, que neste trabalho foi a Função Quártica (biponderada) que possui a seguinte forma reduzida: $px^4 + qx^2 + r = 0$; h é o raio de busca para o empilhamento,

que neste trabalho foi de 5000 m ; x é a posição do centro de cada ponto do *raster* de saída; x_i é a posição do ponto i proveniente do centroide de cada ponto de entrada; e n é o número total de pontos.

Segundo Souza et al. (2013), o estimador de densidade kernel desenha uma vizinhança circular ao redor de cada ponto da amostra, correspondendo ao raio de influência, e então é aplicada uma função matemática (função quártica) de 1, na posição do ponto, a 0, na fronteira da vizinhança. O valor para a célula é a soma dos valores kernel sobrepostos, e divididos pela área de cada ponto tomado como referência. Para identificação das classes de erodibilidade, utilizou-se a classificação assim denominada: muito baixa, baixa, moderadamente baixa, moderadamente alta, alta e muito alta. O *raster* resultante desse procedimento pode ser visto na Figura 13.

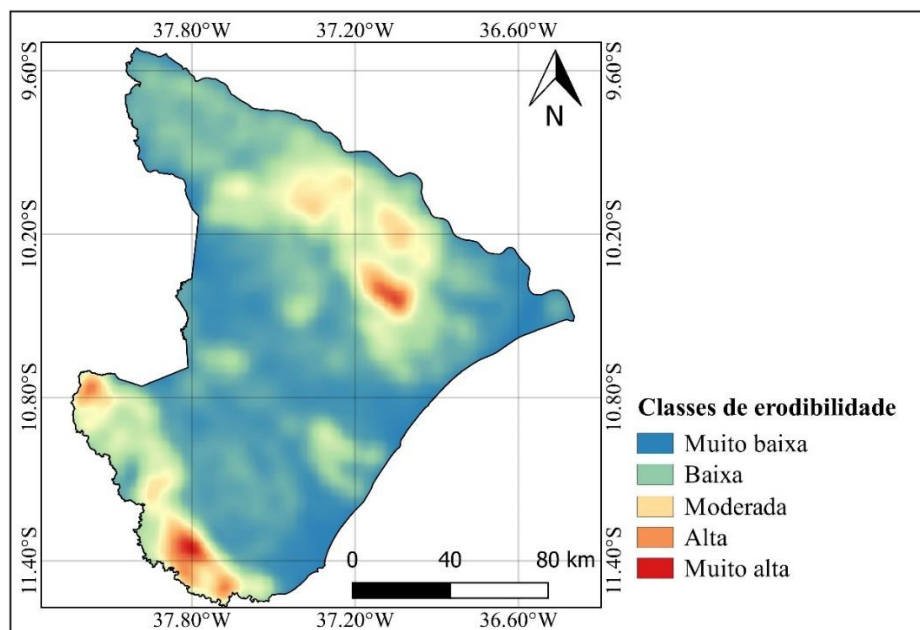


Figura 13 - Mapa das classes de erodibilidade do solo para o estado de Sergipe.

4.2.1.3. Índice de Vegetação Melhorado (Enhanced Vegetation Index - EVI)

Os dados de EVI foram obtidos a partir do produto MOD13A3 do sensor MODIS, disponíveis no site do *Earth Data Search* da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (do inglês *National Aeronautics and Space Administration* - NASA). Este produto possui dados mensais para os índices *Normalized Digital Vegetation Index* (NDVI) e para o EVI. Neste trabalho foi utilizado o segundo devido a minimização das variações de fundo do dossel das vegetações e por manter a sensibilidade em áreas de vegetação densa. Enquanto o NDVI é

sensível a clorofila, o EVI tem uma resposta à variações na estrutura do dossel, incluindo índice de área foliar (LAI), tipo de copa, fisionomia vegetal e arquitetura de dossel (Gao et al., 2000). Segundo Didan et al (2015), o produto é gerado usando os resultados obtidos a cada 16 dias a partir de um algoritmo de composição temporal baseado em média ponderada, que transforma esses valores num dado mensal. De acordo com Huete et al. (2002) a Equação (3) pode ser utilizada para o cálculo do EVI.

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1 \times \rho_{RED} - C2 \times \rho_{Blue} + L} \quad (3)$$

Em que ρ_{NIR} , ρ_{RED} e ρ_{Blue} são respectivamente as bandas do infravermelho próximo, do vermelho e do azul com as devidas correções atmosféricas (espalhamento Rayleigh e absorção do ozônio); C1 e C2 são os coeficientes de resistência ao aerossol, que usa a banda azul para corrigir influências de aerossol na banda vermelha; L é o termo de ajuste de fundo do dossel da vegetação e G é o fator de ganho. Os coeficientes adotados no algoritmo EVI são, L = 1, C1 = 6, C2 = 7,5, e G = 2,5.

Foram adquiridos dados de todos os meses dos anos de 2000 e 2019 do produto MOD13A3. Os mesmos possuem resolução espacial de 1 km x 1 km, Datum WGS-84 e estão disponíveis em quadriculas de 10° x 10° no formato *Hierarchical Data Format Earth Observing System* (HDF-EOS). Após adquiridos os dados foram recortados para o limite do estado de Sergipe e reformatados para o formato GeoTIFF. A partir do *plugin* Calculadora Raster os dados mensais foram transformados em médias anuais dos valores de EVI, como mostra a Figura 14 para os anos de 2000 (a) e 2019 (b). Os dados de EVI variam de 0 a 1, valores próximos de 0 representam solos expostos ou com pouca vegetação, corpos hídricos e áreas urbanas, valores próximos a 1 representam áreas com uma vegetação mais densa.

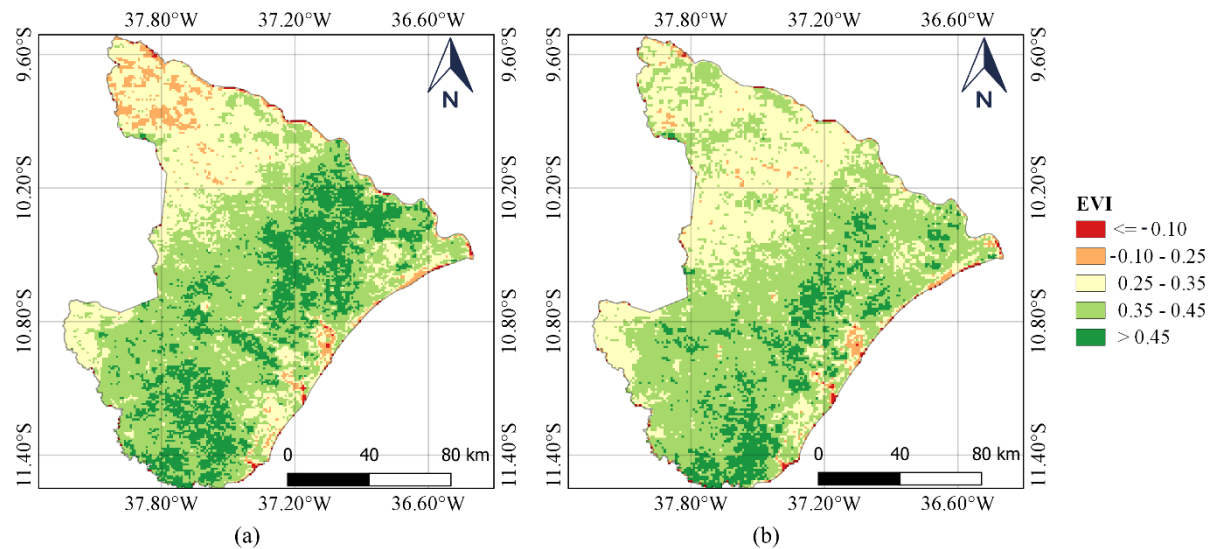


Figura 14 - Mapas de distribuição do EVI para os anos de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe segundo os dados do produto MOD13A3 do MODIS, disponíveis no portal Earth Data Search.

4.2.1.4. Uso e cobertura do solo

Os dados de uso e cobertura de solo para os anos de 2000 e 2019 foram adquiridos a partir do projeto MapBiomas (Souza et. al., 2020). Os dados pertencem a coleção 5 lançada em 2020. Os dados da Coleção 5 do MapBiomas apresentam os 35 anos (1985 a 2019) dos mapas anuais de cobertura e uso do solo do Brasil em escala de 30 m com melhorias na acurácia nos biomas e novas classes de agricultura.

Para realizar o download das informações, no site do MapBiomas foi selecionado o estado de Sergipe e os anos de 2000 e 2019. Os dados são disponíveis no formato matricial com Datum WGS-84, onde cada pixel possui um valor numérico (ID) que varia de 1 a 33 para indicar a qual classe pertence. Para facilitar o tratamento das informações os arquivos no formato matricial foram vetorizados. Após este procedimento, uma tabela criada com o nome das classes para cada ID foi unida ao dado vetorial o que possibilitou a classificação temática do produto a partir do nome das classes. Posteriormente os dados foram convertidos novamente em formato matricial (*raster*) para ser usado nas próximas etapas do trabalho.

A Figura 15 apresenta os mapas de classificação de uso cobertura da terra para os anos de 2000 (a) e 2019 (b) respectivamente de acordo com o MapBiomas.

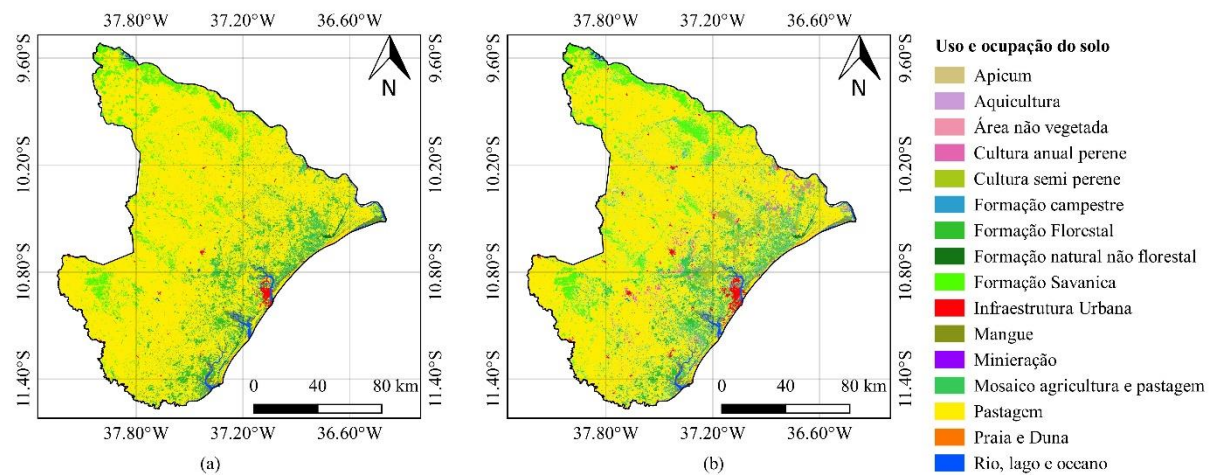


Figura 15 - Mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe segundo os dados do produto MapBiomass.

4.2.1.5. Declividade e Altitude

As informações de declividade e altitude foram geradas a partir dos dados disponíveis no projeto Topodata (Valeriano, 2009). O projeto Topodata oferece o Modelo Digital de Elevação (MDE) e suas derivações locais básicas em cobertura nacional, elaborados a partir dos dados da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) disponibilizados pela *United States Geological Survey* (USGS) na internet. Os dados estão todos estruturados em quadrículas de 1° de latitude por 1,5° de longitude e resolução espacial de 30 m. Para compreender todo o estado de Sergipe foram adquiridas seis quadrículas.

As quadrículas foram fusionadas a partir do *plugin* Mosaico do QGIS. Após a união o produto foi recortado para se encaixar no limite do estado de Sergipe. Para a produção dos dados de declividade, Figura 16 (a), utilizou-se a ferramenta de “declividade” do *plugin* Análise de Terreno do QGIS. Essa ferramenta calcula a declividade a partir do método descrito por Horn (1981), em que médias são calculadas a partir do MDE de entrada, utilizando-se de uma grade de 3 x 3 pixels. Ou seja, os algoritmos são executados levando em consideração um conjunto de 8 pixels vizinhos ao pixel central. Já para produzir a altitude, o *raster* foi classificado em seis classes em função do valor de altitude em metros, conforme a Figura 16 (b).

A declividade foi representada seguindo as classes definidas pela Embrapa (1979) para declividade do relevo no Manual de métodos de análise de solos, em que possuem a seguinte relação com o relevo: 0 a 3 %, relevo plano; 3 a 8%, relevo suave ondulado; 8 a 20%, relevo

ondulado; 20 a 45%, relevo forte ondulado; 45-75%, relevo montanhoso e acima de 75%, relevo forte montanhoso.

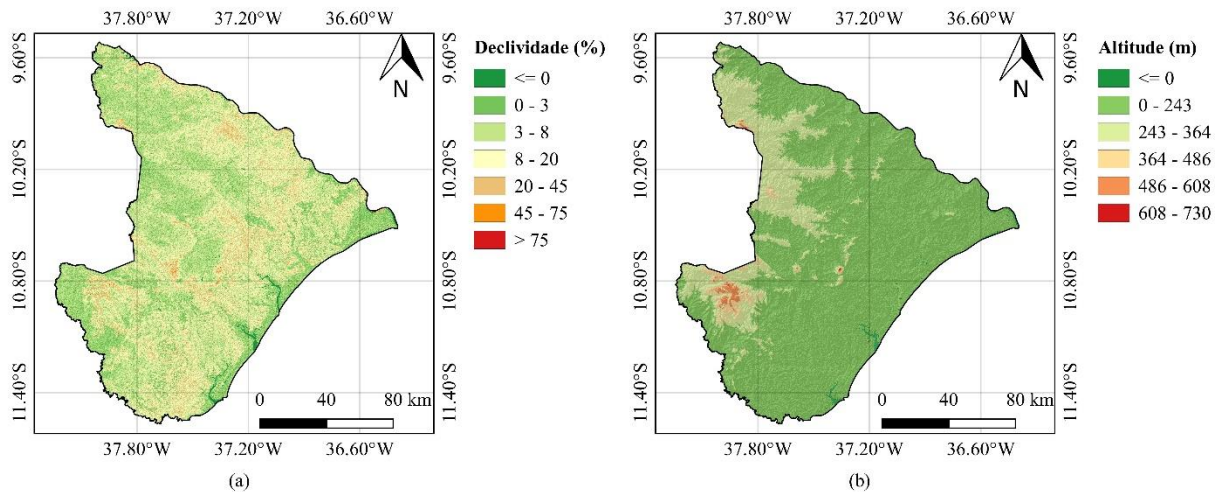


Figura 16 - Mapas de declividade (a) e altitude (b) para o estado de Sergipe segundo os dados do disponíveis pelo projeto Topodata.

4.2.1.6. Geologia, geomorfologia e Pedologia

Os dados de geologia, geomorfologia e pedologia foram adquiridos a partir do Atlas Digital de Recursos Hídricos da SEMARH/SRH (2014). Os dados vetoriais estão disponíveis no banco de dados em formato *shapefile*, no Datum Sirgas 2000, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 24-S. Os dados foram reprojetados para o Datum WGS-84 e transformados em dados matriciais (rasterizados). Os mapas geológicos, geomorfológicos e pedológico foram apresentados anteriormente neste trabalho respectivamente nos tópicos 4.1.3, 4.1.4 e 4.1.5.

4.3. Fuzzificação dos dados

A fuzzificação dos dados consiste no conjunto de técnicas utilizadas para transformar os dados de uma determinada variável em um conjunto *fuzzy* (com valores entre 0 e 1). À medida que aumenta a contribuição da variável para a degradação ambiental do solo, aumenta o valor no intervalo de 0 a 1. Para algumas das variáveis foram utilizadas funções de pertinência, como as funções sigmoidal (precipitação, declividade e altitude) e linear (EVI, erodibilidade, uso e ocupação do solo, geologia, geomorfologia e pedologia).

As funções sigmoidal e linear são controladas por quatro pontos ordenados do valor mais baixo ao mais alto. Os pontos podem ser duplicados para a criação de funções monotônicas

ou simétricas. Neste trabalho tanto a função linear Equação (4), quanto a função sigmoidal Equação (4), foram utilizadas em suas formas monotônicas. Funções monotônicas são aquelas que preservam ou invertem a relação de ordens entre as variáveis. Quando a variável contribuía para a degradação à medida que seus valores aumentavam foram usadas equações lineares ou sigmoides monotônicas crescentes. Quando a variável não contribuía para o aumento da degradação à medida que seus valores aumentavam, foram usadas equações monotônicas decrescentes.

$$F(x) = \frac{P_{\min} - x}{P_{\max} - P_{\min}} \quad (4)$$

$$F(x) = \left(\cos^2 \cdot \frac{(x - P_{\max})}{(P_{\max} - P_{\min})} \cdot \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

4.3.1. Precipitação

Para a precipitação, a função de pertinência utilizada foi a função sigmoidal. De acordo com Ladeira (2011), em seu trabalho intitulado “Uso da função sigmoidal para desagregação do bloco de tormenta obtido da curva IDF estudo de caso: bacia de Val-de-cans”, a função sigmoidal cosseno pode ser utilizada pois observou-se que as chuvas naturais geram graficamente curvas em formato de “S”, o mesmo formato gráfico da função sigmoidal. A função foi aplicada a partir da ferramenta Calculadora *raster*.

4.3.2. EVI

Para o EVI a função utilizada foi a linear monotônica crescente inversa, pois quanto maior os valores de EVI maior a densidade e vigor vegetativo da cobertura vegetal e por consequência, menor o potencial de degradação.

4.3.3. Declividade

Os dados de declividade foram fuzzificados a partir da equação sigmoidal monotônica crescente, pois quanto maior a declividade maior o potencial de degradação ambiental. A equação sigmoidal foi escolhida seguindo os trabalhos de Zaidan et al. (2006), Marcelino et al. (2004), Vanacor et al. (2006) e Pinto et al. (2015), pois os mesmos observaram que essa equação representa de maneira mais adequada a distribuição dos valores de declividade na paisagem natural

4.3.4. Altitude

Os dados de altitude foram fuzzificados a partir da equação sigmoideal monotônica crescente. De acordo com Crepani et al. (2001), quanto maior a amplitude altimétrica maior é a energia potencial e maior a capacidade de morfogênese, aumentando assim o potencial de degradação.

4.3.5. Erodibilidade

Para a fuzzificação dos dados de erodibilidade, utilizou-se a equação linear monotônica crescente, uma vez que quanto maior a densidade de kernel encontrada a partir das lineações da rede hidrográfica, maior a erodibilidade, e por consequência, maior o potencial de degradação.

4.3.6. Uso e cobertura do solo

Para a fuzzificação dos dados de uso e cobertura do solo, partiu-se do arquivo vetorial que continha as classes de uso e ocupação do solo. Primeiramente, a partir da ferramenta Calculadora de Atributos do Qgis, utilizou-se do comando Calculadora de Campo para atribuir os valores do modelo *fuzzy* a cada um dos polígonos que formavam as classes (137.061 para o ano 2000 e 155.618 para o ano de 2019). Para isso usou-se um algoritmo com a rotina presente na Figura 17.

```

CASE
WHEN "classes_1" = 'Formação campestre' THEN '0.3'
WHEN "classes_1" = 'Formação Savânica' THEN '0.3'
WHEN "classes_1" = 'Formação Florestal' THEN '0.2'
WHEN "classes_1" = 'Apicum' THEN '0.15'
WHEN "classes_1" = 'Mangue' THEN '0.10'
WHEN "classes_1" = 'Aquicultura' THEN '0.15'
WHEN "classes_1" = 'Formação natural não florestal' THEN '0.4'
WHEN "classes_1" = 'Pastagem' THEN '0.7'
WHEN "classes_1" = 'Cultura anual perene' THEN '0.6'
WHEN "classes_1" = 'Cultura semi perene' THEN '0.6'
WHEN "classes_1" = 'Mosaico agricultura e pastagem' THEN '0.4'
WHEN "classes_1" = 'Praia e Duna' THEN '0.8'
WHEN "classes_1" = 'Infraestrutura Urbana' THEN '1.0'
WHEN "classes_1" = 'Área não vegetada' THEN '0.8'
WHEN "classes_1" = 'Formação campestre' THEN '0.3'
WHEN "classes_1" = 'Mineração' THEN '1.0'
WHEN "classes_1" = 'Afloramento Rochoso' THEN '0.8'
WHEN "classes_1" = 'Floresta Plantada' THEN '0.3'
END

```

Figura 17 - Algoritmo usado para atribuir os valores fuzzy para cada uma das classes de uso e ocupação do solo, para os anos de 2000 e 2019.

Os valores foram atribuídos as classes de acordo como grau de contribuição de cada uma para o aumento do potencial de degradação ambiental do solo. Os valores foram distribuídos baseados em trabalhos presentes na literatura como os de: Canavesi et al. (2013), Roy e Saha (2019), Lee (2007) e Balamurugan et al. (2016).

4.3.7. Geologia

Para a fuzzificação dos dados de geologia, foi necessário a utilização do *Pluquim Semi-Automatic Classification*, disponível no Qgis. Nesse aplicativo é possível reclassificar os pixels de um arquivo matricial. O *raster* com os dados de geologia possuíam pixels com valores identificadores de 1 a 10 para as classes geológicas, resultantes da etapa de rasterização executada no tratamento inicial dos dados.

Esses valores foram reclassificados e passaram a variar de 0 a 1 a depender do grau de contribuição de cada domínio geológico presente na área de estudo para o aumento da degradação ambiental do solo. Os valores foram atribuídos após um estudo das características de cada domínio geológico e estão dispostos na Tabela 1, juntamente com os domínios geológicos em questão.

Tabela 1 - Valores *fuzzy* atribuídos a cada um dos domínios geológicos.

Domínio	Valor <i>fuzzy</i>
Domos Simão Dias e Itabaiana	0,10
Canindé	0,15
Poço Redondo	0,20
Mucururé	0,30
Vaza Barris	0,40
Marancó	0,45
Estância	0,50
Bacia Tucano	0,55
Bacia Sergipe	0,75
Formações superficiais	1,00

4.3.8. Geomorfologia

Para a fuzzificação dos dados de geomorfologia, seguiu-se o mesmo procedimento realizado com os dados de geologia. A partir de um arquivo *raster* com as classes geomorfológicas, e com valores de pixels de 1 a 4 para cada uma das classes. A partir do *Plugin Semi-Automatic Classification*, foi realizada uma reclassificação dos valores dos pixels, aumentando de 0 a 1 conforme a classe contribuía para o aumento da degradação ambiental do solo, a depender de suas características. A Tabela 2 apresenta os valores das classes geomorfológicas e os valores *fuzzy* atribuídos a cada uma delas.

Tabela 2 - Valores *fuzzy* atribuídos a cada uma das classes geomorfológicas.

Classe geomorfológica	Valores <i>fuzzy</i>
Pediplano sertanejo	0,20
Serras residuais	0,40
Tabuleiros costeiros	0,80
Planície costeira	1,00

4.3.9. Pedologia

A fuzzificação dos dados de pedologia de maneira idêntica ao processo que gerou a fuzzificação dos dados geológicos e geomorfológicos. Um *raster* com as classes de tipos de solo, com valores de pixels identificando as classes de 1 a 10 para cada uma das classes, foi usado na reclassificação a partir do *Plugin Semi-Automatic Classification*. O resultado assim como nos casos anteriores, foi um arquivo matricial com pixels com valores entre 0 e 1, aumentando caso as características dos tipos de solo contribuíssem para o aumento do potencial de degradação ambiental do solo, como pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de solo e seus valores *fuzzy* atribuídos.

Tipo de solo	Valores <i>fuzzy</i>
Latossolo	0,30
Argissolos	0,60
Chernossolos	0,60
Espedossolo	0,60
Luvissolo	0,60
Planossolo	0,60
Cambiossolo	0,80
Gleissolo	1,00
Neossolos	1,00
Vertissolos	1,00

4.4. Aplicação do Operador *Fuzzy Gamma*

Para iniciar a aplicação do Operador *Fuzzy Gamma* (OFG) é necessário a escolha dos valores que serão utilizados no expoente “ γ ” na Equação (6), que representa o modelo.

$$\mu_{(\text{combination})} = (\text{soma algébrica})^{\gamma} \times (\text{produto algébrico})^{(1-\gamma)} \quad (6)$$

O expoente *gamma* (γ) tem como características gerar cenários mais ou menos restritivos, otimistas ou pessimistas, a depender do valor a ele atribuído, variando de 0 a 1. Segundo Lee (2007) a escolha criteriosa de *gamma* produz resultados que garantem um compromisso flexível entre a tendência de “aumento” da soma algébrica e a tendência de “diminuição” devido os efeitos do produto algébrico. Neste trabalho foram testados quatro valores para o expoente *gamma*, são eles: 0,2; 0,4; 0,6 e 0,8. Os valores 0 e 1 não foram utilizados, uma vez que quando *gamma* é igual a 0, não se caracteriza a função Operador *Fuzzy Gamma*, mas sim a função Produto Algébrico. Já se *gamma* for igual a 1, se caracteriza a função Soma Algébrica. Segundo Shiran et al. (2017), na função Produto Algébrico todas as camadas de informação são multiplicadas e os valores entre 0 e 1 do produto gerado se trona muito próximo de 0, tendenciando a cenários muito otimistas. Ou seja, para este trabalho haveria tendencia de os resultados gerar áreas elevadas de baixo a muito baixo potencial de degradação ambiental.

Já na Soma Algébrica, o somatório dos complementos dos valores *fuzzy* das camadas de informações é calculado, e em seguida seu complemento, por essa razão, ao contrário do Produto Algébrico, os valores são muito próximos de 1, o que levaria a um resultado final com tendências pessimistas, gerando um resultado final com elevados valores de áreas classificadas como alto ou muito alto potencial de degradação.

O modelo foi aplicado primeiramente com as variáveis contendo os dados para o ano 2000 para cada um dos valores *gamma* de interesse e em seguida para o ano de 2019, alterando-se apenas os valores do expoente *gamma* na equação. Para isso utilizou-se da ferramenta Calculadora *raster* do Qgis para implementar a equação. Os resultados obtidos após a aplicação do OFG tiveram seus dados divididos dentre cinco classes de potencial de degradação ambiental do solo, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Classes de potencial de degradação ambiental do solo.

Intervalo	Classe
0,0 – 0,2	Muito baixo
0,2 – 0,4	Baixo
0,4 – 0,6	Moderado
0,6 – 0,8	Alto
0,8 – 1,0	Muito alto

Para corroborar com a análise e o entendimento dos dados, foram realizados alguns procedimentos como:

- Cálculo das áreas das classes para cada um dos valores de *gamma* testados para os anos de 2000 e 2019;
- Regressões lineares entre os dados fuzzificados e o resultado obtido para o *gamma* igual a 0,6 para os anos de 2000 e 2019. Esse valor de *gamma* foi selecionado para que os efeitos de cenários muito pessimistas ou muito otimistas não influenciassem na regressão causando resultados tendenciosos;
- Cálculo das áreas que sofreram ou não mudança nas classes de potencial de degradação ambiental do solo entre os anos de 2000 e 2019, tomando como base o resultado gerado pela aplicação do OFD tendo *gamma* igual a 0,6;

4.5. Cálculo das áreas para cada um dos valores de *gamma*

Para o cálculo das áreas utilizou-se da ferramenta “*Classification Report*” do *plugin*, *Semi Automatic Classification*. Essa ferramenta produz um relatório com a quantidade de pixels, área em porcentagem e área em graus ao quadrado (grau²) para cada classe. Esse relatório foi exportado para o software Excel, onde a partir de uma transformação, calculou-se as áreas em hectares.

4.6. Cálculo das regressões lineares entre os dados fuzzificados e o resultado obtido para o *gamma* igual a 0,6 para os anos de 2000 e 2019

A regressão linear foi calculada com o objetivo de se obter o coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis fuzzificadas e o resultado obtido pelo OFD aplicado com expoente *gamma* igual a 0,6. Utilizou-se o algoritmo *r.regression.line* do menu de Processamentos do Qgis.

De acordo com Martins (2014), o coeficiente de correlação amostral de Pearson, representado por *r*, é uma medida de direção e grau com que duas variáveis do tipo quantitativa, se associam linearmente. Sejam as variáveis *x* e *y* representadas por $(x,y) = \{(x_i,y_i)\}$, com $i = 1,...,n$, uma amostra de dados bivariados, o coeficiente de Pearson calcula-se pela Equação (7), com $\bar{x}$ e $\bar{y}$ obtidos respectivamente pelas Equações (8) e (9).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (8)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (9)$$

Ainda de acordo com Martins (2014), o coeficiente de correlação de Pearson assume valores entre -1 e 1. Quanto maior for o valor de *r*, em módulo, maior será o grau de associação linear entre as variáveis. A associação será linear positiva se *r* for positivo, ou seja, existe uma correlação direta e uma variável tem seus valores aumentando com o aumento da outra variável. A associação será linear negativa se *r* for negativo, ou seja, existe uma correlação inversa e os

valores das variáveis aumentam (diminuem) enquanto os valores da outra variável diminuem (aumentam).

Foram tomadas como referência as classes de correlação para os valores de r propostas por Gomes et al. (2014), dispostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Correspondência entre os valores de r e o Índice de Correlação de Pearson.

Valor de r	Correlação
-1	Negativa perfeita
$-1 < r \leq -0,7$	Negativa forte
$-0,7 < r \leq -0,5$	Negativa moderada
$-0,5 \leq r < 0$	Negativa fraca
0	Nula
$0 < r \leq 0,5$	Positiva fraca
$0,5 < r \leq 0,7$	Positiva moderada
$0,7 \leq r < 1$	Positiva forte
1	Positiva perfeita

Fonte: Adaptado de Gomes et al. (2014).

4.7. Cálculo das mudanças de classes entre 2000 e 2019

Para calcular as mudanças ocorridas entre as classes de potencial de degradação do solo, foi utilizado um procedimento semelhante a operação de subtração de bandas espectrais de imagem multiespectrais de diferentes anos. De acordo com Meneses e Almeida (2012), A subtração de bandas é uma operação de grande recurso prático para detectar mudanças temporais dos alvos presentes em uma área, como na detecção de impactos ambientais e na avaliação de desmatamentos florestais.

Neste trabalho, no lugar de bandas espectrais, foram utilizados os *rasters* com os resultados do OFG de expoente igual a 0,6 para os anos de 2000 e 2019. A partir da ferramenta “Calculadora Raster” do Qgis a operação de subtração entre os dois dados foi realizada. A lógica da operação funciona da seguinte maneira: pixels com valores negativos indicam uma mudança para uma classe de maior potencial de degradação; pixels com valores iguais ou próximos de 0 indicam que não houve mudança na classe de degradação; pixels com valores positivos indicam que houve mudança para uma classe de menor potencial de degradação ambiental.

5. RESULTADOS

5.1. Variáveis fuzzificadas

5.1.1. Precipitação

Para a precipitação, obteve-se após a aplicação da ferramenta Calculadora *raster*, com os parâmetros Pmin e Pmáx sendo respectivamente 650 e 1650 para o ano 2000 e 650 e 1400 para o ano 2019. A Figura 18 apresenta a distribuição dos valores *fuzzy* na área de estudo para a precipitação nos anos de 2000 e 2019.

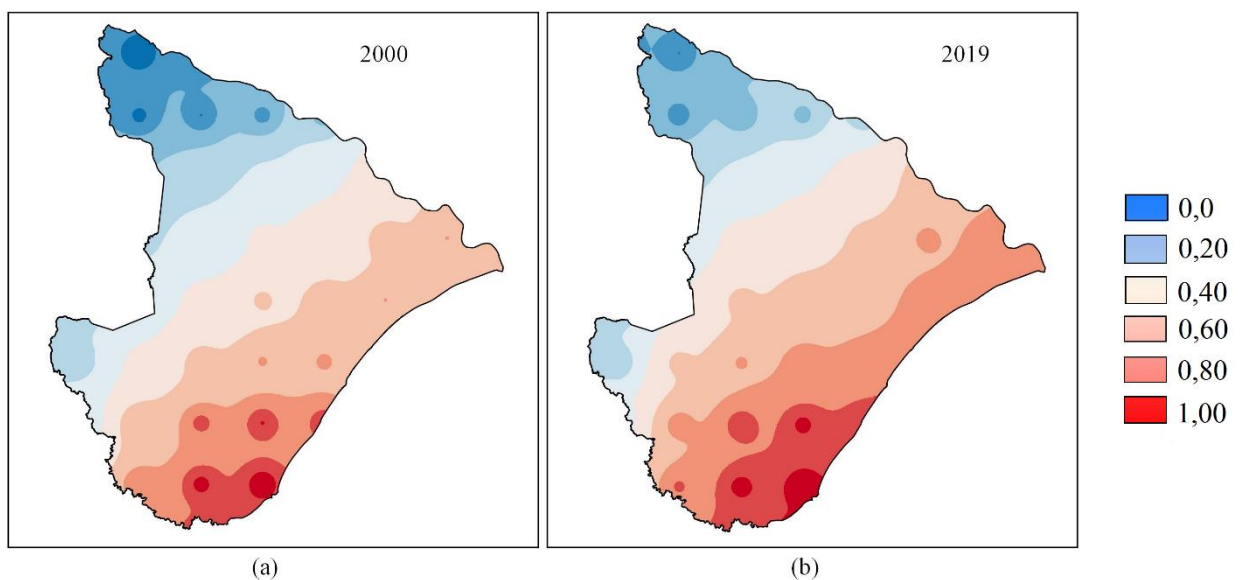


Figura 18 - Distribuição dos valores fuzzy para a precipitação no ano de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe.

5.1.2 EVI

O EVI foi fuzzificados com os parâmetros Pmin e Pmáx iguais respectivamente a -0,10 e 0,45, tanto para o ano 2000 como para 2019, os resultados podem ser vistos na Figura 19, que apresenta a distribuição dos valores *fuzzy* na área de estudo.

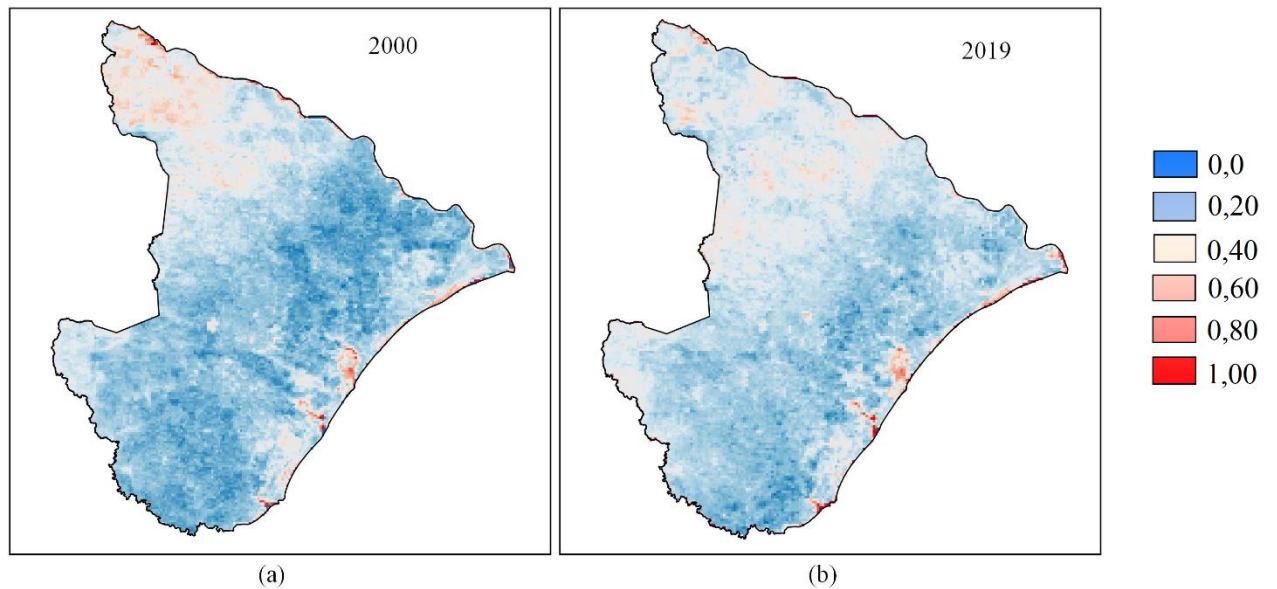


Figura 19 - Distribuição dos valores fuzzy para o EVI no ano de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe.

5.1.3. Declividade

A fuzzificação dos valores de declividade foi obtida a partir do uso dos parâmetros P_{min} e $P_{máx}$, respectivamente 0° e 45° . A Figura 20, apresenta a distribuição dos valores *fuzzy* na área de estudo referente a declividade.

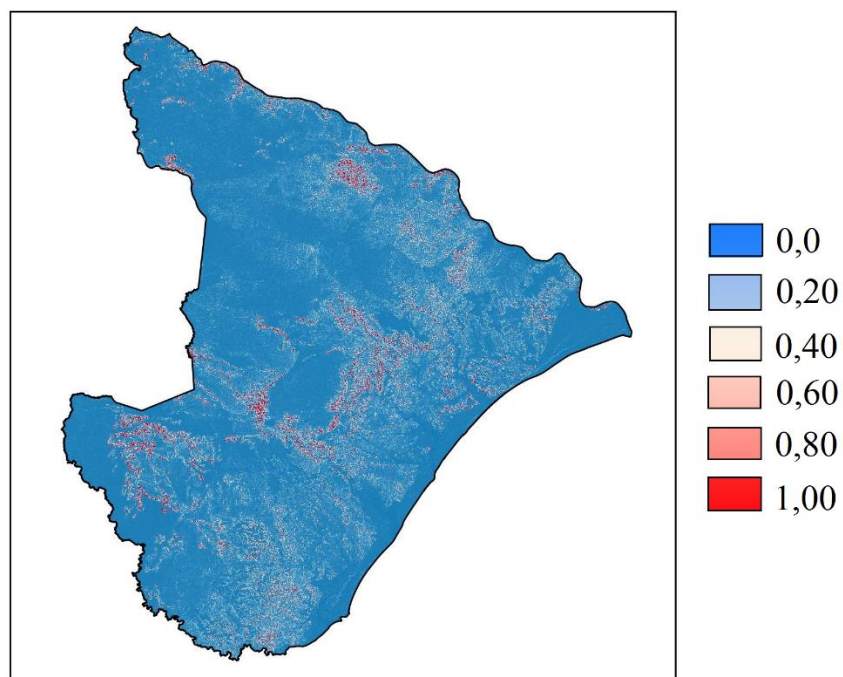


Figura 20 - Distribuição dos valores fuzzy referente a declividade para o estado de Sergipe.

5.1.4. Altitude

Para a fuzzificação dos dados de altitude, os parâmetros P_{min} e $P_{máx}$ utilizados foram respectivamente 200 m e 500 m. A Figura 21, apresenta a distribuição dos valores *fuzzy* na área de estudo referente a altitude.

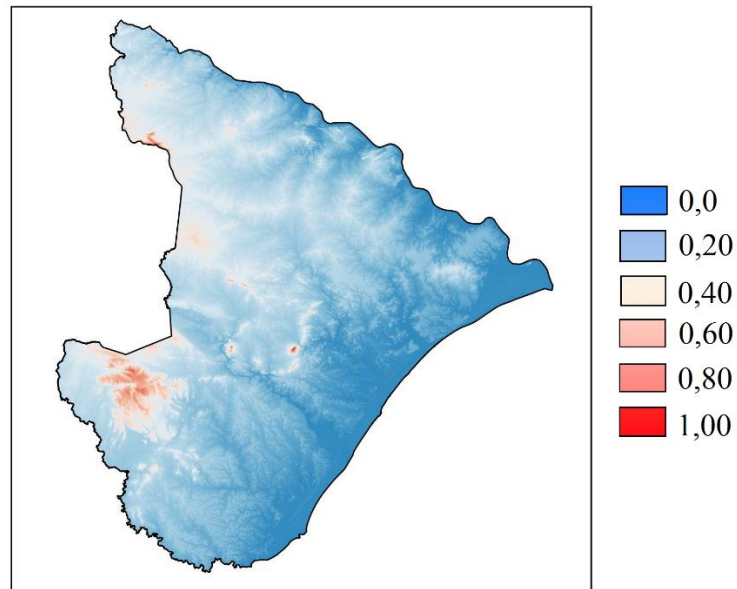


Figura 21 - Distribuição dos valores fuzzy referente a altitude para o estado de Sergipe.

5.1.5. Erodibilidade

Para a erodibilidade, o *raster* com o resultado do empilhamento dos pontos, a partir do raio de 5000 m, apresentou valores de 0 a 26.179, tais valores foram utilizados respectivamente como parâmetros P_{min} e $P_{máx}$. A Figura 22, apresenta a distribuição dos valores *fuzzy* na área de estudo referente a erodibilidade.

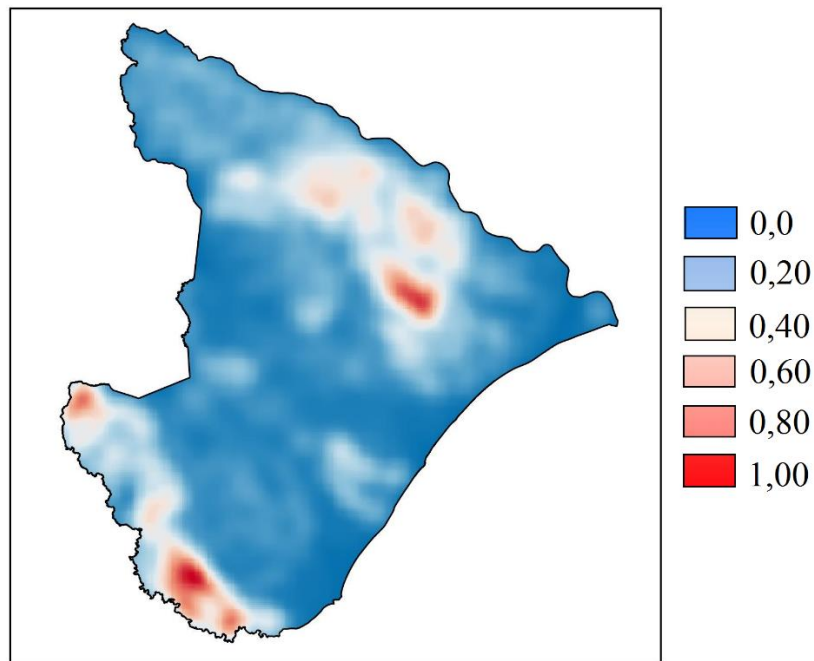


Figura 22 - Distribuição dos valores fuzzy referente a altitude para o estado de Sergipe.

5.1.6. Uso e cobertura do solo

O resultado, com os valores que foram atribuídos às classes, de acordo como grau de contribuição de cada uma para o aumento do potencial de degradação ambiental do solo, pode ser visualizado na Figura 23.

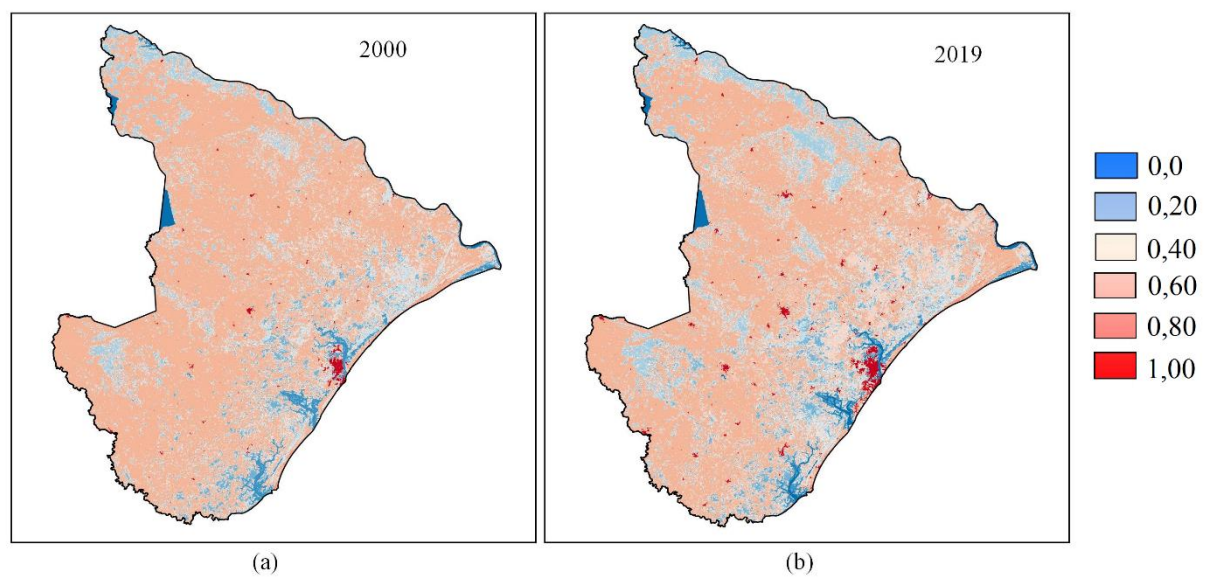


Figura 23 - Distribuição dos valores fuzzy referentes ao uso e cobertura do solo nos anos de 2000 (a) e 2019 (b) para o estado de Sergipe.

5.1.7. Geologia

Para as classes geológicas, o resultado obtido a partir da fuzzificação com os valores atribuídos após o estudo das características de cada domínio geológico, estão dispostos na Figura 24.

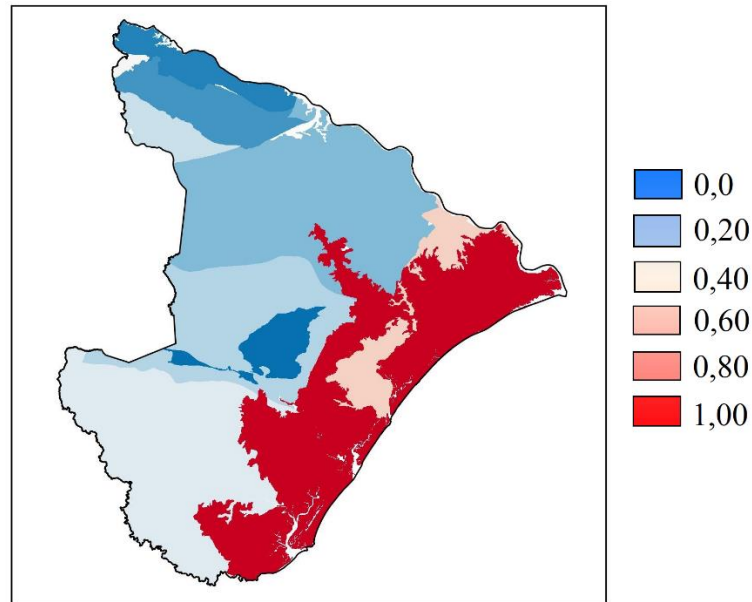


Figura 24 - Distribuição dos valores fuzzy referente a geologia para o estado de Sergipe.

5.1.8. Geomorfologia

O resultado da fuzzificação dos valores atribuídos para as classes geomorfológicas está presente na Figura 25.

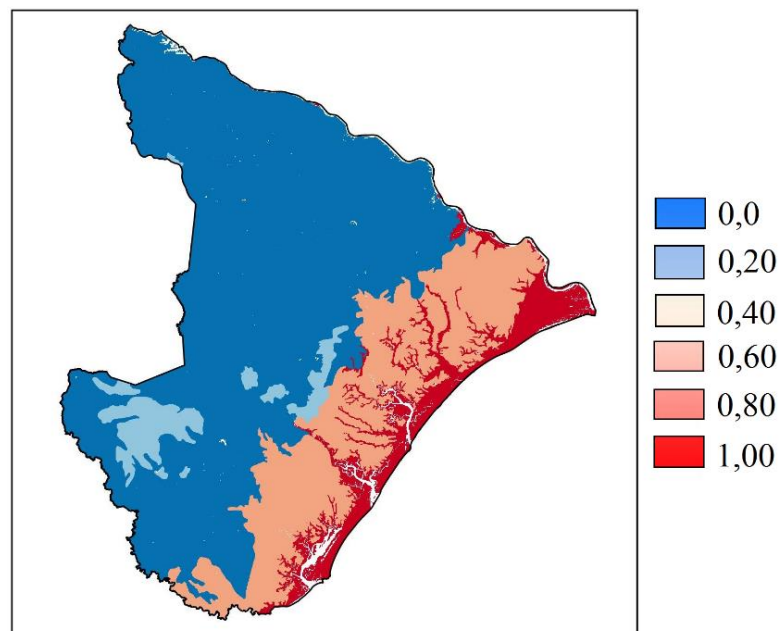


Figura 25 - Distribuição dos valores fuzzy referente a geomorfologia para o estado de Sergipe.

5.1.9. Pedologia

O resultado da fuzzificação dos tipos de solo, assim como nos casos anteriores, foi um arquivo matricial com pixels com valores entre 0 e 1, aumentando caso as características dos tipos de solo contribuíssem para o aumento do potencial de degradação ambiental do solo, como pode ser observado na Figura 26.

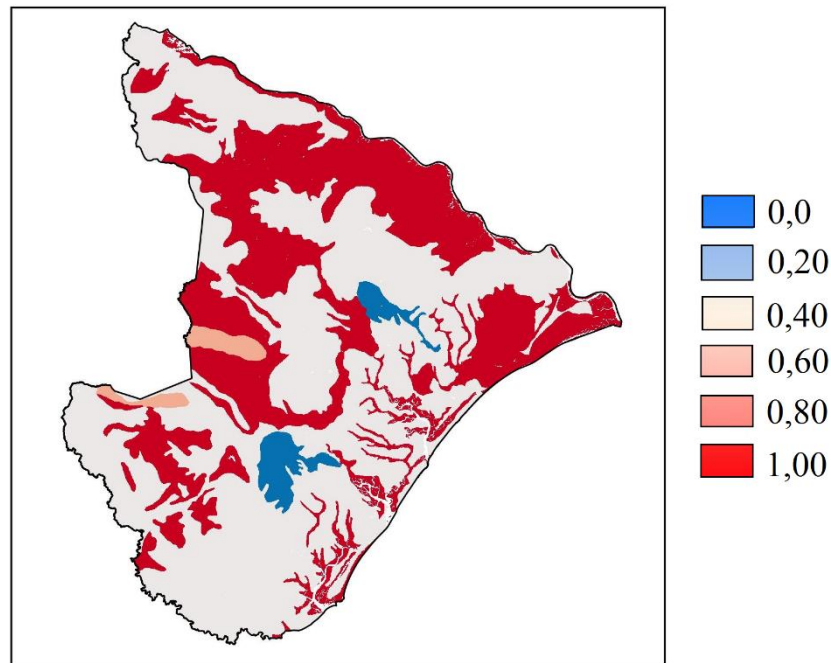


Figura 26 - Distribuição dos valores fuzzy referente a pedologia para o estado de Sergipe.

5.2. Mapas de classes de potencial de degradação ambiental do solo

5.2.1. Cenário obtido com *gamma* igual a 0,2 para o ano 2000

A Figura 27, apresenta o mapa com o resultado obtido para a aplicação do Operador *Fuzzy Gamma* (OFD) com o expoente *gamma* igual a 0,2, representando o cenário mais otimista na estimativa do potencial de degradação ambiental do solo para o ano 2000.

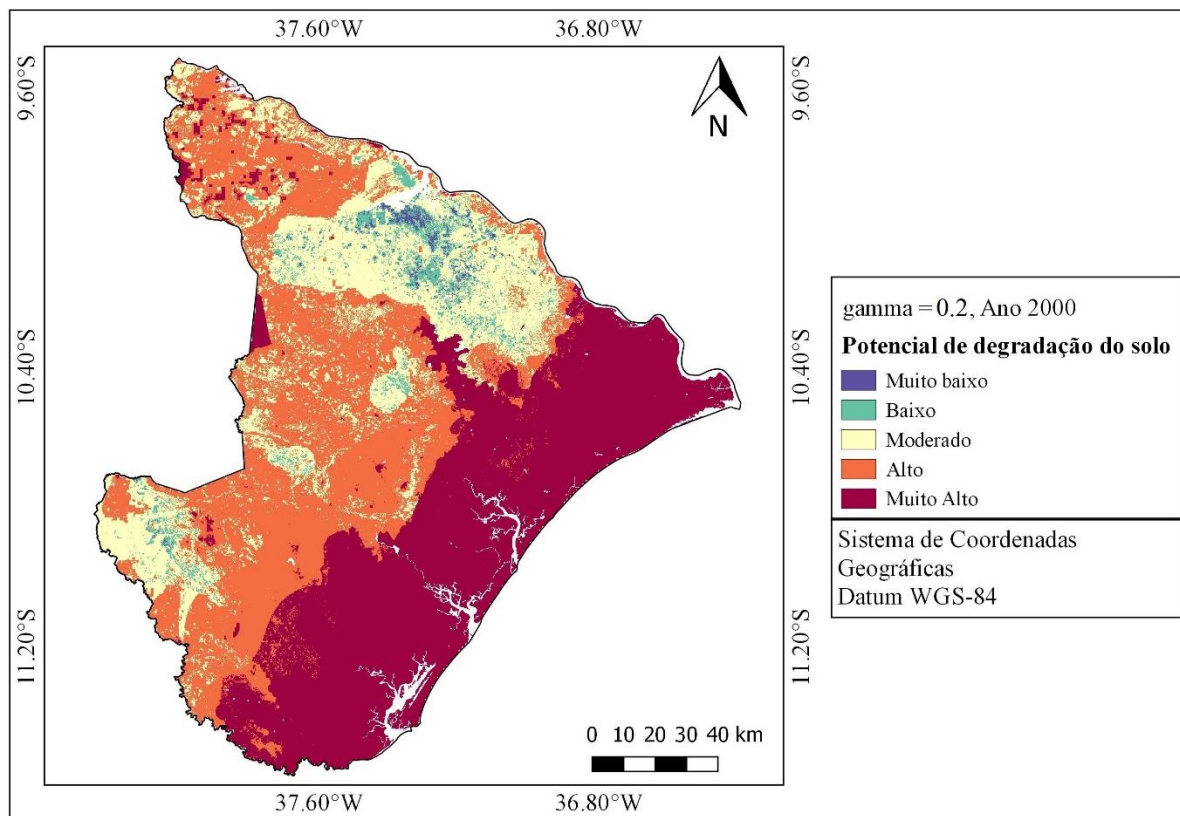


Figura 27 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,2 para o ano 2000.

A Tabela 6 apresenta os resultados gerados para os cálculos das áreas das classes presentes na área de estudo de acordo com o resultado obtido para o OFD com expoente *gamma* igual a 0,2. As áreas estão dispostas em quantidades de pixels, porcentagem e hectares. As classes moderado, alto e muito alto foram as que obtiveram resultados mais expressivos em detrimento das classes muito baixo e baixo.

Tabela 6 - Áreas das classes de potencial de degradação ambiental do solo (*gamma* = 0,2) para o ano 2000.

Classe	Pixels	Porcentagem (%)	Área (ha)
Muito baixo	28138	0,61	13204,11
Baixo	175826	3,84	82508,54
Moderado	972469	21,24	456343,20
Alto	1639748	35,81	769472,10
Muito alto	1761865	38,50	826777,10

5.2.2. Cenário obtido com *gamma* igual a 0,4 para o ano 2000

A Figura 28, apresenta o mapa com o resultado obtido para a aplicação do Operador Fuzzy Gamma (OFD) com o expoente *gamma* igual a 0,4, para o potencial de degradação ambiental do solo para o ano 2000.

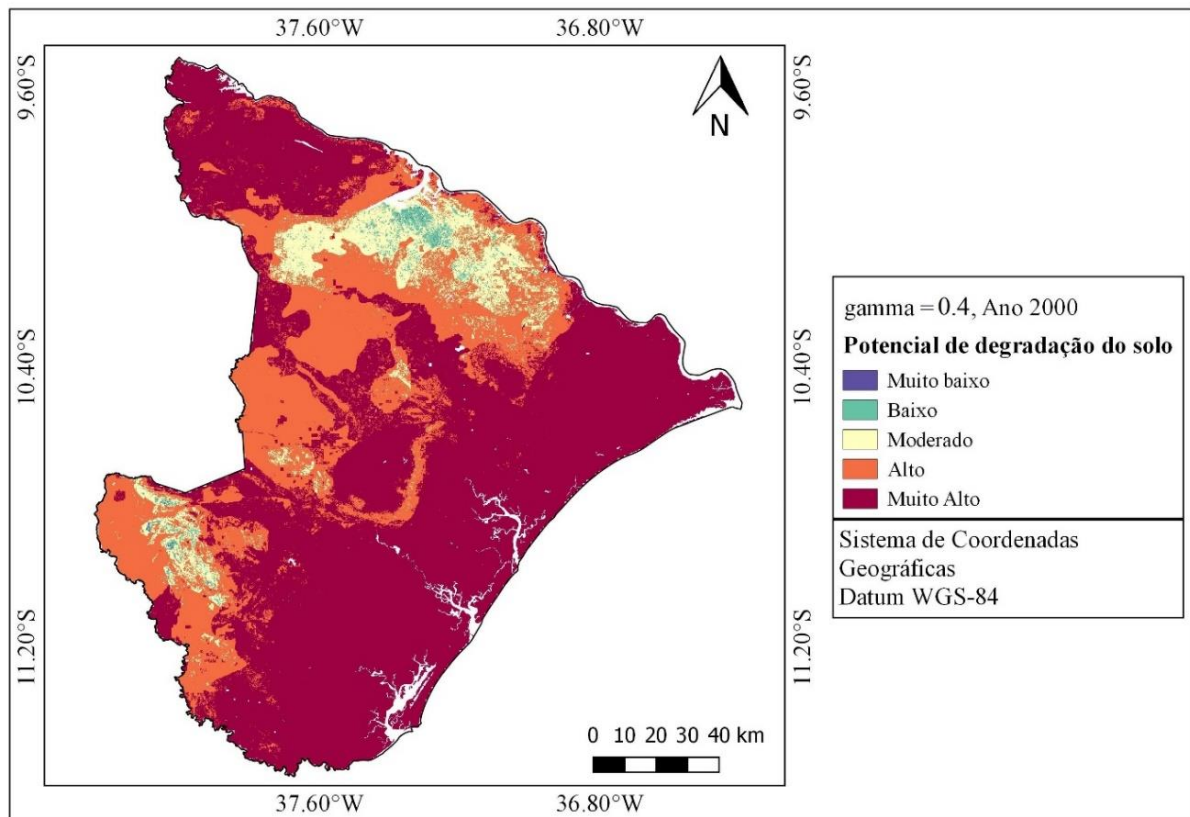


Figura 28 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,4 para o ano 2000.

A Tabela 7 apresenta os resultados gerados para os cálculos das áreas das classes presentes na área de estudo de acordo com o resultado obtido para o OFD com expoente *gamma* igual a 0,4. É possível notar a partir da Tabela 7 que houve uma predominância da classe de potencial de degradação, muito alto, em relação as demais classes. Quando comparado com o mapa de *gamma* igual a 0,2, observa-se que houve uma redução dos valores das classes muito baixo, baixo, moderado e alto, em contrapartida ao aumento da classe muito alto. Esse comportamento das áreas corresponde ao esperado uma vez que o valor de *gamma* desse mapa foi elevado.

Tabela 7 - Áreas das classes de potencial de degradação ambiental do solo ($\gamma = 0,4$) para o ano 2000.

Classe	Pixels	Porcentagem	Área (ha)
Muito baixo	1695	0,04	795,40
Baixo	50241	1,03	23576,21
Moderado	323373	7,03	151746,80
Alto	1290802	28,80	605724,90
Muito alto	2930772	63,10	1375301,22

5.2.3. Cenário obtido com γ igual a 0,6 para o ano 2000

A Figura 29, apresenta o mapa com o resultado obtido para a aplicação do Operador *Fuzzy Gamma* (OFD) com o expoente γ igual a 0,6, para o potencial de degradação ambiental do solo para o ano 2000.

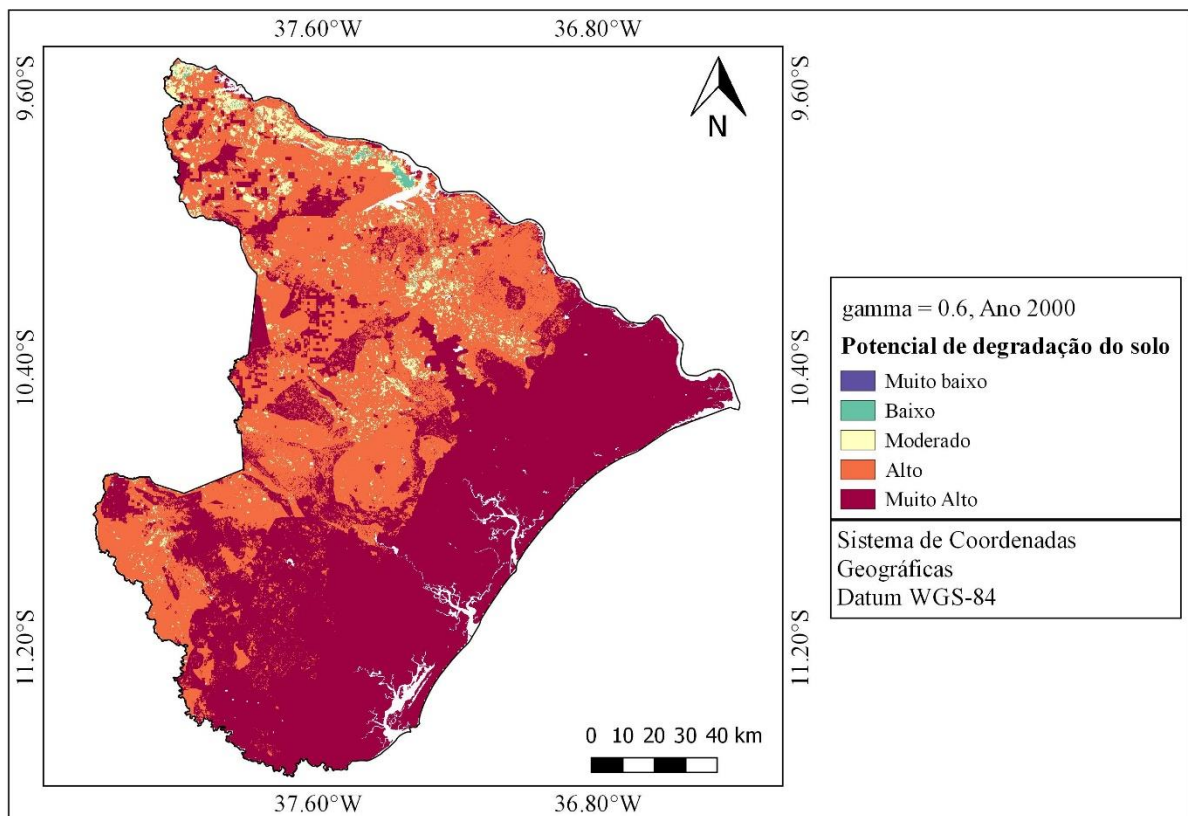


Figura 29 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, γ igual a 0,6 para o ano 2000.

A Tabela 8 apresenta os resultados gerados para os cálculos das áreas das classes presentes na área de estudo de acordo com o resultado obtido para o OFD com expoente *gamma* igual a 0,6. É possível notar a partir da Tabela 8 que houve uma predominância das classes de potencial de degradação, alto e muito alto, em relação as demais classes. Quando comparado com o mapa de *gamma* igual a 0,4 observa-se que houve uma elevação dos valores das classes muito baixo, baixo, moderado e alto. Em relação a classe muito alto, nota-se que houve uma redução de 63,75% para 43,87%, quando comparado com o mapa gerado com *gamma* igual a 0,4.

Tabela 8 - Áreas das classes de potencial de degradação ambiental do solo (*gamma* = 0,6) para o ano 2000.

Classe	Pixels	Porcentagem	Área (ha)
Muito baixo	8416	0,18	3949,31
Baixo	78246	1,70	36717,91
Moderado	421553	9,13	197819,00
Alto	2081643	45,11	976836,90
Muito alto	2024513	43,87	950027,90

5.2.4. Cenário obtido com *gamma* igual a 0,8 para o ano 2000

A Figura 30, apresenta o mapa com o resultado obtido para a aplicação do Operador *Fuzzy Gamma* (OFD) com o expoente *gamma* igual a 0,8, representando o cenário mais pessimista na estimativa do potencial de degradação ambiental do solo para o ano 2000.

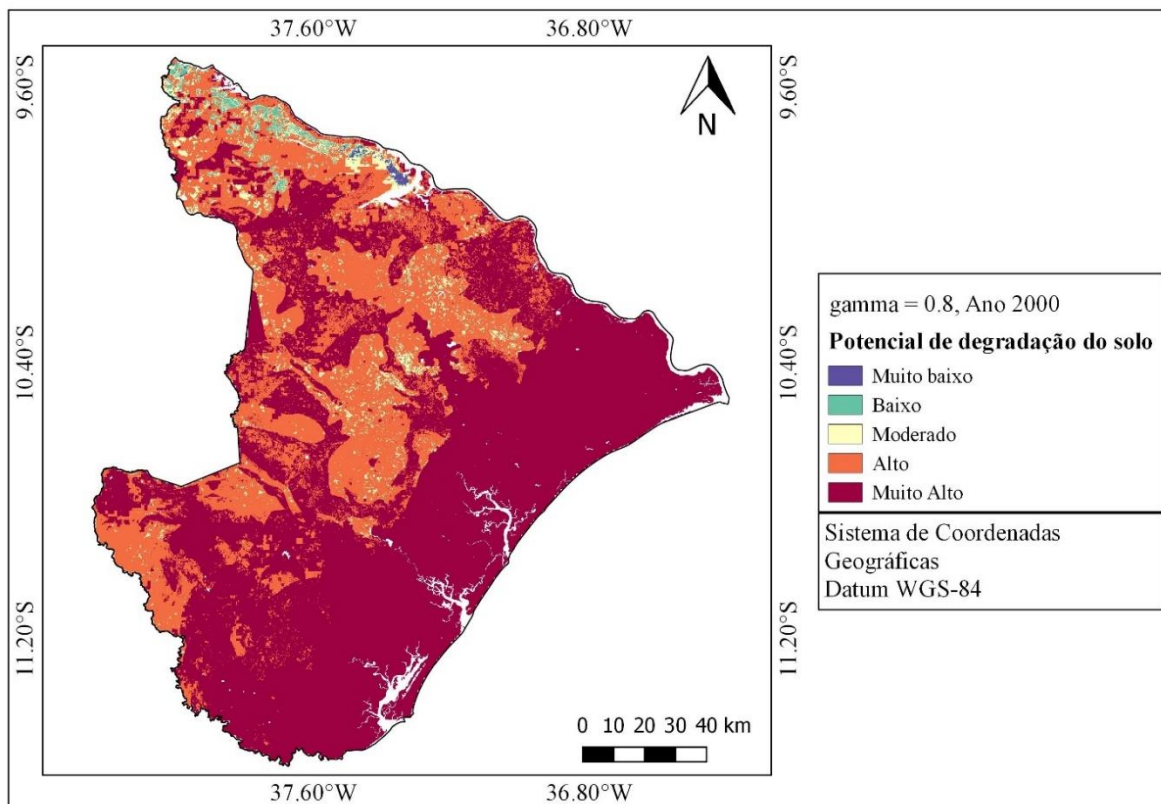


Figura 30 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,8 para o ano 2000.

A Tabela 9 apresenta os resultados gerados para os cálculos das áreas das classes presentes na área de estudo de acordo com o resultado obtido para o OFD com expoente *gamma* igual a 0,8. É possível notar a partir da Tabela 9 que houve uma predominância da classe muito alto, em relação as demais. Quando comparado com os resultados gerados para *gamma* igual a 0,6, observa-se que houve uma redução das classes muito baixo, baixo, moderado e alto. Esse resultado condiz com o fato desse resultado ter sido gerado com o maior valor de *gamma*, igual a 0,8.

Tabela 9 - Áreas das classes de potencial de degradação ambiental do solo (*gamma* = 0,8) para o ano 2000.

Classe	Pixels	Porcentagem	Área (ha)
Muito baixo	3411	0,074	1600,65
Baixo	18916	0,41	8876,56
Moderado	93111	2,02	43693,49
Alto	824227	17,85	386778,80
Muito alto	367611	79,64	1725202,00

5.2.5. Cenário obtido com *gamma* igual a 0,2 para o ano 2019

A Figura 31, apresenta o mapa com o resultado obtido para a aplicação do Operador Fuzzy Gamma (OFD) com o expoente *gamma* igual a 0,2, representando o cenário mais otimista na estimativa do potencial de degradação ambiental do solo para o ano 2019.

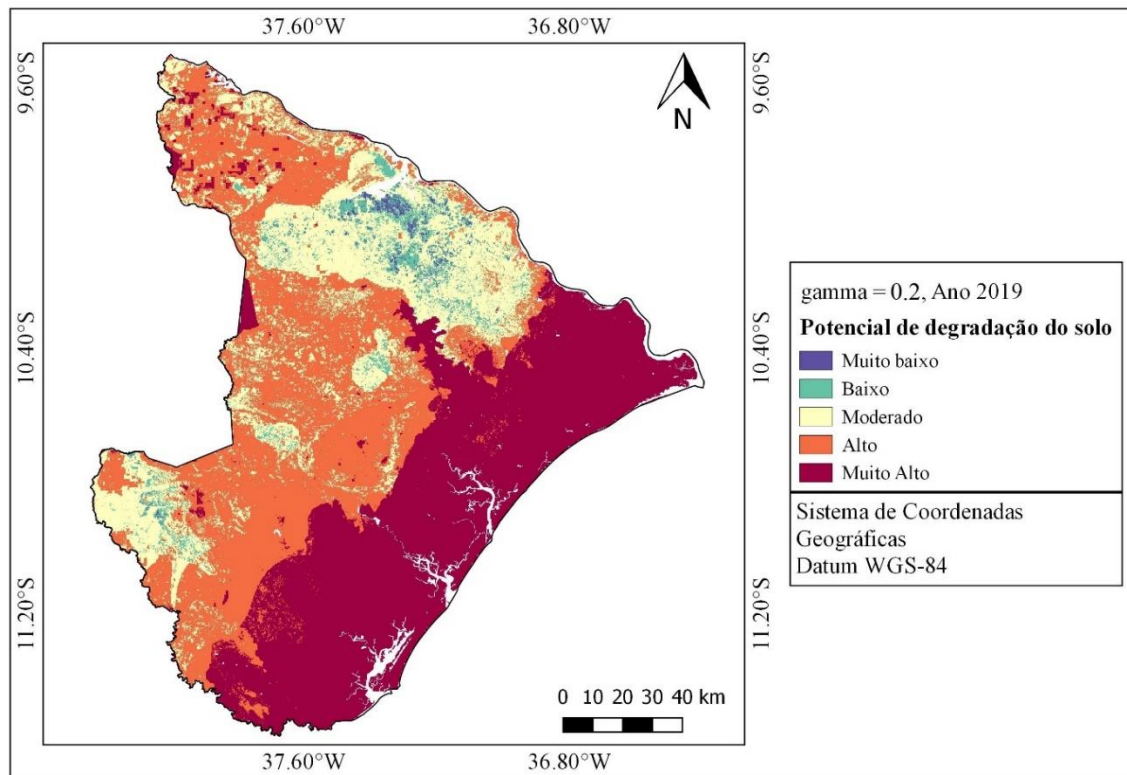


Figura 31- Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, gamma igual a 0,2 para o ano 2019.

A Tabela 10 apresenta os resultados gerados para os cálculos das áreas das classes presentes na área de estudo de acordo com o resultado obtido para o OFD com expoente *gamma* igual a 0,2, para o ano de 2019. As classes moderado, alto e muito alto foram as que obtiveram resultados mais expressivos em detrimento das classes muito baixo e baixo, comportamento semelhante ao ocorrido com o resultado obtido com expoente *gamma* igual a 0,2 para o ano 2000.

Tabela 10 - Área das classes de Potencial de degradação ambiental do solo, *gamma* igual a 0,2 para o ano 2019.

Classe	Pixels	Porcentagem	Área (ha)
Muito baixo	7730	0,17	3627,40
Baixo	107162	2,32	50287,10
Moderado	769055	16,67	360888,60
Alto	1899150	41,17	891199,80
Muito alto	1829195	39,66	858372,50

5.2.6. Cenário obtido com *gamma* igual a 0,4 para o ano 2019

A Figura 32, apresenta o mapa com o resultado obtido para a aplicação do Operador *Fuzzy Gamma* (OFD) com o expoente *gamma* igual a 0,4, para o potencial de degradação ambiental do solo para o ano 2019.

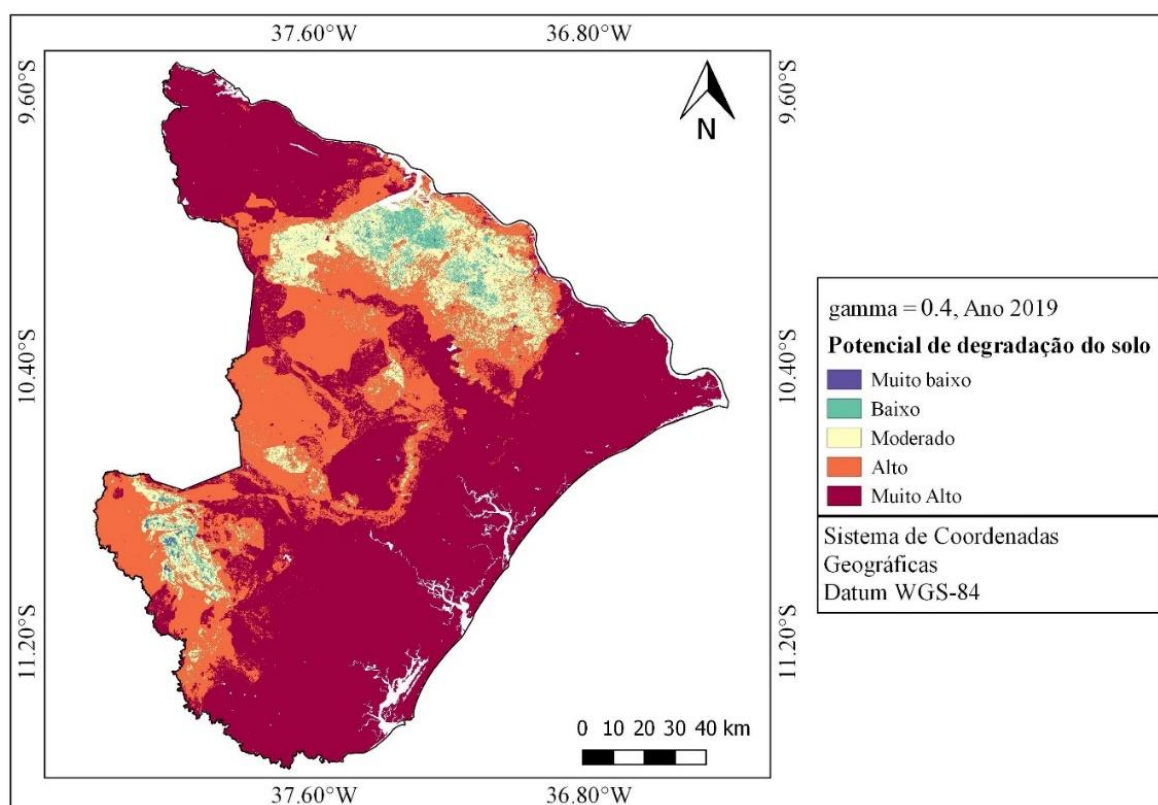


Figura 32 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, *gamma* igual a 0,4 para o ano 2019.

A Tabela 11 apresenta os resultados gerados para os cálculos das áreas das classes presentes na área de estudo de acordo com o resultado obtido para o OFD com expoente *gamma* igual a 0,4, para o ano de 2019. É possível notar a partir da Tabela 11 que houve uma predominância das classes de potencial de degradação, muito alto e alto em relação as demais classes. Quando comparado com o mapa de *gamma* igual a 0,2 para o ano de 2019, observa-se que houve uma redução dos valores das classes muito baixo, moderado e alto, em contrapartida ao aumento das classes baixo e muito alto.

Tabela 11 - Área das classes de Potencial de degradação ambiental do solo, *gamma* igual a 0,4 para o ano 2019.

Classe	Pixels	Porcentagem	Área (ha)
Muito baixo	5380	0,12	2524,632
Baixo	254524	5,62	119438,60
Moderado	649222	14,33	304655,50
Alto	1705647	37,64	800396,10
Muito alto	1916288	42,30	899242,00

5.2.7. Cenário obtido com *gamma* igual a 0,6 para o ano 2019

A Figura 33, apresenta o mapa com o resultado obtido para a aplicação do Operador *Fuzzy Gamma* (OFD) com o expoente *gamma* igual a 0,6, para o potencial de degradação ambiental do solo para o ano 2019.

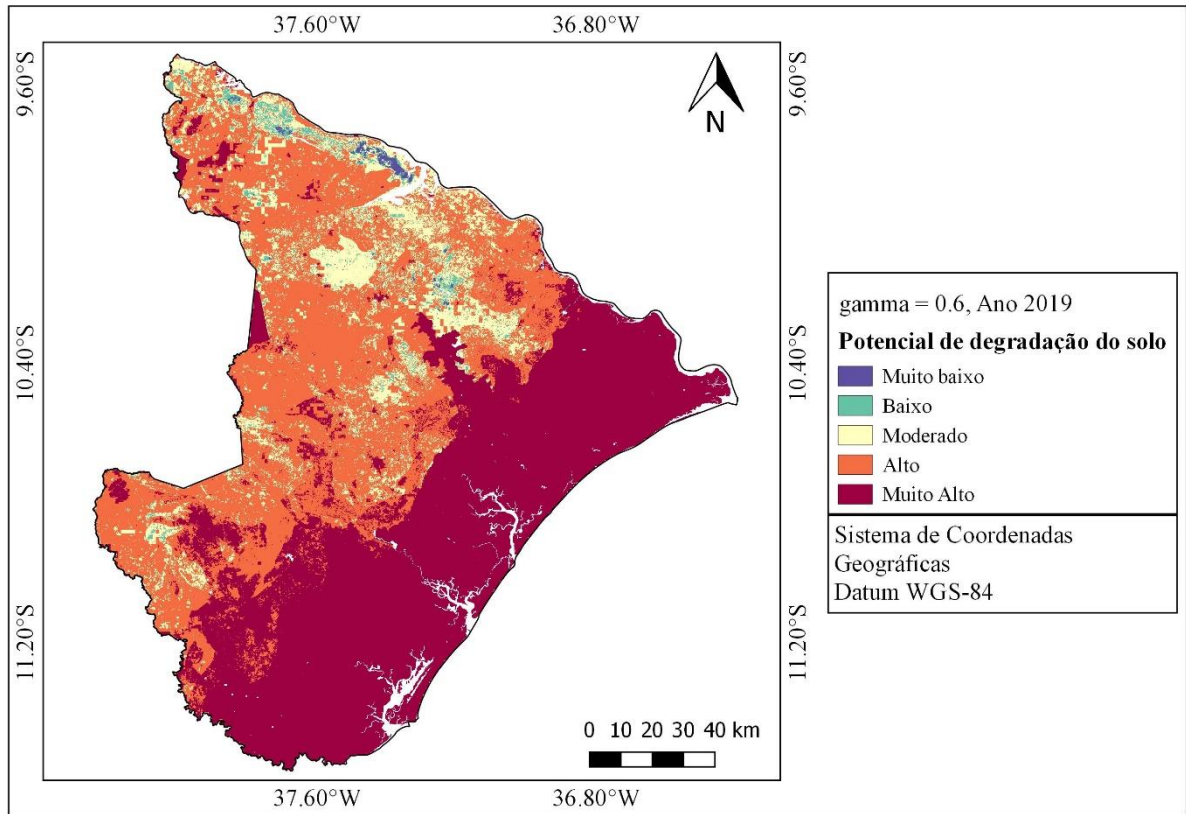


Figura 33 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, γ igual a 0,6 para o ano 2019.

A Tabela 12 apresenta os resultados gerados para os cálculos das áreas das classes presentes na área de estudo de acordo com o resultado obtido para o OFD com expoente γ igual a 0,6, para o ano de 2019. É possível notar a partir da Tabela 12 que houve uma predominância das classes de potencial de degradação, alto e muito alto, em relação as demais classes. Quando comparado com o mapa de γ igual a 0,4 para o ano de 2019, observa-se que houve uma leve elevação dos valores das classes muito baixo, no entanto as classes baixo e moderado tiveram reduções. Em relação as classes alto e muito alto, nota-se que houve uma elevação de 42,30% para 46,50%.

Tabela 12 - Área das classes de Potencial de degradação ambiental do solo, *gamma* igual a 0,6 para o ano 2019.

Classe	Pixels	Porcentagem	Área (ha)
Muito baixo	12817	0,28	6014,53
Baixo	73447	1,60	34465,92
Moderado	512066	11,10	240293,30
Alto	1870441	40,53	877727,70
Muito alto	2146298	46,50	1007177,00

5.2.8 Cenário obtido com *gamma* igual a 0,8 para o ano 2019

A Figura 34, apresenta o mapa com o resultado obtido para a aplicação do Operador *Fuzzy Gamma* (OFD) com o expoente *gamma* igual a 0,8, representando o cenário mais pessimista na estimativa do potencial de degradação ambiental do solo para o ano 2019.

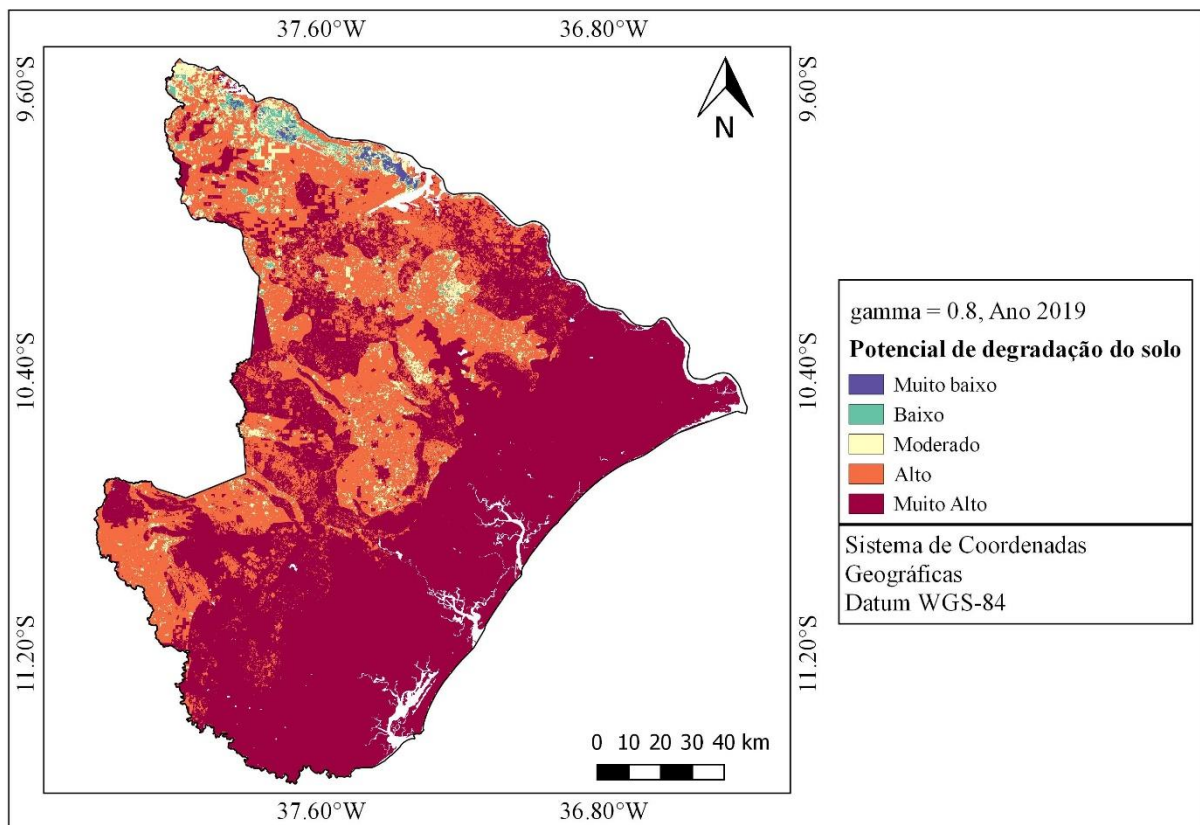


Figura 34 - Mapa de Potencial de degradação ambiental do solo, *gamma* igual a 0,8 para o ano 2019.

A Tabela 13 apresenta os resultados gerados para os cálculos das áreas das classes presentes na área de estudo de acordo com o resultado obtido para o OFD com expoente *gamma* igual a 0,8 para o ano de 2019. É possível notar a partir da Tabela 13 que houve uma predominância da classe muito alto, em relação as demais, com 80,65% da área. Quando comparado com os resultados gerados para *gamma* igual a 0,6, observa-se que houve um leve aumento da classe muito baixo e uma redução das classes baixo, moderado e alto. Esse resultado condiz com o fato desse resultado ter sido gerado com o maior valor de *gamma*, igual a 0,8.

Tabela 13 - Área das classes de Potencial de degradação ambiental do solo, *gamma* igual a 0,8 para o ano 2019.

Classe	Pixels	Porcentagem	Área (ha)
Muito baixo	18135	0,40	8510,07
Baixo	33586	0,73	15760,65
Moderado	94369	2,04	44283,83
Alto	746499	16,17	350303,90
Muito alto	3723201	80,65	1747178,00

5.3. Análise das correlações

Este tópico trata de uma discussão a partir dos resultados encontrados pela regressão linear realizada neste trabalho, além de identificar as características das variáveis de estudo e sua contribuição para o aumento ou diminuição das classes de potencial de degradação ambiental do solo. Os resultados para a regressão linear e para o coeficiente de Pearson estão presentes na Tabela 14, de acordo com Figueredo et al. (2014) é importante não esquecer que correlação é diferente de causalidade. Toda causalidade pressupõe correlação, mas nem toda correlação é sinônimo de causalidade. Vale ressaltar que a partir desse tópico todas as análises foram feitas tomando como resultado final os mapas gerados a partir da aplicação do OFD com expoente *gamma* igual a 0,6, para os dois anos em estudo. Como mencionado anteriormente esse resultado foi escolhido para minimizar os efeitos de cenários com tendências muito otimistas ou muito pessimistas.

Outros estudos com temáticas e objetivos semelhantes a este, testaram e selecionaram outros valores para o expoente *gamma*, como é o caso de: Pradhan et al. (2009), em seu estudo para mapear o risco de deslizamentos a partir da lógica *fuzzy*, que selecionaram o expoente *gamma* igual a 0,8; Canavesi et al. (2013), testaram os valores de *gamma* igual a 0,7 e 0,8 e

detectaram o aumento das classes de susceptibilidade ao deslizamento de terra em seu trabalho de análise da susceptibilidade a deslizamentos de terra para o município de Paraibuna em São Paulo; Kumar e Anbalagan (2015) testaram valores de *gamma* iguais a 0,7, 0,75, 0,80, 0,85, 0,90 e 0,95 para produzir e comparar seis diferentes possíveis cenários para a susceptibilidade a erosão da região do reservatório de Tehir, Índia; Amirahmadi et al. (2016) testaram os valores 0,7 e 0,9 em seu estudo de susceptibilidade de deslizamento no Iran.

Tabela 14 - Coeficiente de Pearson e correlações para as variáveis de estudo.

Variável	r (2000)	Correlação	r (2019)	Correlação
Altitude	0,4790	Positiva fraca	0,4768	Positiva fraca
Declividade	0,3018	Positiva fraca	0,2435	Positiva fraca
Erodibilidade	0,1900	Positiva fraca	0,1432	Positiva fraca
EVI	-0,2174	Negativa fraca	-0,2566	Negativa fraca
Geologia	0,7639	Positiva forte	0,7382	Positiva forte
Geomorfologia	0,7104	Positiva forte	0,6784	Positiva moderada
Pedologia	0,6658	Positiva moderada	0,4523	Positiva fraca
Precipitação	0,6675	Positiva moderada	0,6052	Positiva moderada
Uso e cobertura do solo	0,2618	Positiva fraca	0,2988	Positiva fraca

Para o ano 2000 as variáveis com maior correlação foram geologia e geomorfologia, classificados como possuindo uma correlação forte positiva. Pedologia e precipitação foram classificadas com correlação positiva moderada. Altitude, declividade, erodibilidade e uso e ocupação do solo foram classificados como tendo uma correlação positiva fraca. O EVI, única variável que associada inversamente ao aumento da degradação ambiental do solo, apresentou uma correlação negativa fraca.

Já para o ano de 2019, a única variável classificada como forte positiva foi a geologia. Para este ano, geomorfologia e precipitação foram classificadas como tendo uma correlação positiva moderada. Altitude declividade, erodibilidade, pedologia e uso e ocupação do solo foram classificados como tendo uma correlação positiva fraca. O EVI foi classificado como correlação negativa fraca.

5.4. Análise das classes de potencial ambiental de degradação do solo

Observa-se, de maneira geral, que tanto para o mapa de potencial de degradação ambiental do solo para os anos de 2000 e 2019, que formas geométricas de uma ou outra variável de entrada acabam se encontrando de forma mais evidente, o que indica uma contribuição maior ou menor para as classes de potencial de degradação ambiental do solo na área de estudo.

5.4.1. Aspectos geológicos

Como pode-se notar ao comparar os mapas de potencial de degradação ambiental do solo para os anos de 2000 e 2019 (Figuras 29 e 33) e o mapa de classes geológicas do estado de Sergipe (Figura 8), as classes de potencial se distribuem da seguinte forma: muito alto, ocorre principalmente nas áreas em que o domínio geológico presente são as Formações Superficiais; a classe de potencial alto ocorre principalmente onde ocorre os domínios Estância, Vaza-Barris, Domos Itabaiana e Simão Dias, Marancó e Poço Redondo; a classe de potencial moderado ocorre principalmente na região central do domínio Mucururé; as classes baixo e muito baixo ocorre principalmente na região central do domínio Mucururé e domínio Canindé. Essa influência já havia sido apontada pelos resultados da regressão linear, uma vez que a variável geologia obteve correlação forte positiva para os anos de 2000 e 2019.

As Formações Superficiais, presentes na parte costeira do estado de Sergipe, do sul sergipano passando pela grande Aracaju e leste sergipano até chegar ao Baixo São Francisco. As formações superficiais, segundo Santos et al. (2001), são constituídas por sedimentos terrígenos (cascalhos, conglomerados, areias finas e grossas e níveis de argila) pouco consolidados e estratificação irregular. As formações superficiais cenozóicas que ocorrem no Estado de Sergipe abrangem o Grupo Barreiras, as coberturas terciário-quaternárias e as coberturas quaternárias (pleistocênicas e holocênicas). De acordo com Aria (2006), o Grupo Barreiras está associado com importantes eventos geológico-oceanográficos isostáticos e eustáticos e constituído por areias finas a grossas com níveis argilosos e conglomeráticos, que contribuíram para o desenvolvimento de processos erosivos naturais. Já West (2017) afirma que a erosão pode ser constatada por um processo originário da dinâmica evolutiva do Grupo Barreiras, sendo dependente da configuração do relevo.

Segundo Shinzato et al. (2008) no grupo barreiras, o predomínio de sedimentos com baixo grau de consolidação torna essas rochas passíveis de se desestabilizar e erodir com facilidade em taludes de corte, se submetidas à precipitação intensa de águas pluviais. São

sedimentos suscetíveis à erosão, quer em áreas úmidas, onde as camadas de argila mole podem se saturar de água, quer em terrenos arenosos, em camadas de areia com baixo grau de consolidação.

5.4.2. Aspectos geomorfológicos

Em relação ao relevo, nota-se ao comparar os mapas de potencial de degradação ambiental do solo para os anos de 2000 e 2019 (Figuras 29 e 33) e o mapa de classes geomorfológicas do estado de Sergipe (Figura 9), que as classes de potencial ocorrem da seguinte maneira: potencial muito alto ocorreu majoritariamente onde ocorrem os domínios geomorfológicos Planícies Costeiras, Tabuleiros Costeiros, e numa porção a sudoeste do estado onde o domínio geomorfológico faz parte das Serras Residuais; classe de potencial alto, ocorrem principalmente no domínio Pediplano Sertanejo; a classe de potencial moderado ocorre com maior frequência na porção noroeste do estado, nos territórios do alto e médio sertão sergipano; as classes de potencial baixo e muito baixo ocorrem coincidentemente nas áreas mais ao noroeste do estado, divisa com Alagoas e distribuídas em pequenas áreas no alto e médio sertão sergipano.

As Planícies Costeiras ocupam o litoral do estado, uma faixa descontínua, assimétrica e alongada no sentido nordeste-sudeste. Segundo Dominguez et al. (1992), as Planícies Costeiras desenvolvem-se a leste dos Tabuleiros Costeiros esculpidos no grupo Barreiras, a planície costeira que integra a zona costeira do estado de Sergipe segue o modelo clássico das costas que avançam em direção ao oceano, em decorrência do acréscimo de sedimentos mais novos, em que cada crista de praia representa depósito individualizado associado a uma antiga linha de praia.

Este domínio geomorfológico apresenta uma complexa evolução paleogeográfica e um diversificado conjunto de padrões de relevo deposicionais de origens marinha, fluviomarinha e eólica (Bittencourt et al., 1983; Carvalho & Fontes, 2006). Entretanto, a feição morfológica dominante consiste nos feixes de cordões arenosos de origem marinha, constituídos por terraços marinhos pleistocênicos, posicionados em cotas um pouco mais elevadas (10 a 15 metros acima do nível do mar); planícies marinhas holocênicas, posicionadas em cotas mais baixas (5 a 10 metros acima do nível do mar).

De acordo com Carvalho e Fontes (2006), nas Planícies Costeiras ocorre uma perturbação de sua continuidade, interrompida pela mobilidade das dunas litorâneas ativas que avançam para o interior em faixas de largura variável e pela ação antrópica. Apoiados na plataforma continental, os cordões litorâneos mostram progressivo desenvolvimento que

conduz ao alargamento dos perfis longitudinais dos rios, criando problemas para a drenagem da planície costeira

Segundo Dantas e Shinzato (2017), incremento do afluxo turístico sobre os frágeis terrenos da planície costeira (sobre restingas, brejos, mangues ou dunas) exige uma atenção especial quanto aos impactos ambientais decorrentes da expansão urbana e da “indústria do turismo” sobre essas áreas valorizadas, em especial, no que concerne ao saneamento ambiental (coleta e tratamento de efluentes domésticos e disposição de resíduos sólidos) e preservação da vegetação nativa.

Já os Tabuleiros Costeiros, segundo Dantas e Shinzato (2017), representam formas de relevo tabulares esculpidas em rochas sedimentares, em geral pouco litificadas e dissecadas por uma rede de canais com baixa a alta densidades de drenagem. Podemos diferenciar duas unidades distintas de tabuleiros, conforme a intensidade da dissecação empreendida sobre os mesmos devido à atuação diferencial da rede de drenagem. Neste sentido, este domínio é subdividido em: tabuleiros conservados, que se caracterizam por amplas superfícies tabulares com vastos topos planos e apresentam um predomínio de processos de pedogênese e formação de solos espessos e bem drenados, com baixa suscetibilidade à erosão e tabuleiros dissecados, que se caracterizam por curtas superfícies tabulares fortemente dissecadas por uma densa rede de canais que desmantelaram a superfície original tabular, resultando num cenário de colinas tabulares, com vertentes declivosas, vales incisos e planícies restritas

Destacam-se também pelo desenvolvimento de solos espessos e bem drenados, mas com uma atuação mais efetiva de processos erosivos (por vezes apresentando áreas sob intensa ação de processos de erosão laminar e linear aceleradas – ravinamentos e voçorocamentos) (Dantas e Shinzato, 2017).

O Pediplano Sertanejo, domínio caracterizado pela presença predominante das classes de potencial de degradação do solo, alto, moderado, baixo e muito baixo respectivamente. Esse domínio segundo Dantas e Shinzato (2017), apresenta-se como uma vasta superfície de erosão e compreende um diversificado conjunto de padrões de relevo com predomínio de formas aplainadas com relevo plano e suavemente ondulado resultante de processos de arrasamento generalizado do relevo sobre diversos tipos de litologias, que se espriam nas porções sudoeste, central e ocidental do estado de Sergipe.

Este domínio é o mais extenso do território de Sergipe e está embasado por rochas do embasamento ígneo-metamórfico pré-cambriano da Faixa de Dobramentos Sergipana, constituída pelos domínios Canindé, Poço Redondo, Marancó, Mucururé, Vaza-Barris e Estância (Santos et al., 2001). Ocorre um predomínio de um conjunto de solos rasos com

fertilidade natural moderada a alta em um ambiente de absoluto predomínio de intemperismo físico em um clima tropical semiárido, com predomínio de vegetação de caatinga.

Dentre os aspectos importantes da geomorfologia estão a declividade e a hipsometria (altitude). A declividade está relacionada com velocidade de transformação da energia potencial em energia cinética, ou seja, com a velocidade das massas d'água em movimentos responsáveis pelo escoamento superficial. A altitude do terreno em relação ao nível do mar auxilia no transporte de sedimentos e intensifica os processos erosivos. Como pode-se observar nos mapas de declividade e altitude de Sergipe (Figuras 16(a) e 16(b)), a maior parte do estado possui áreas com declividades entre 3 a 8% (relevo suave ondulado) e entre 8 a 20% (relevo ondulado) de declividade. Para a altitude, a maior parte do estado possui cotas de 0 a 243 metros de altitude e regiões mais ao sertão do estado com cotas entre 243 e 364 m. As áreas com declividades e altitudes mais acentuadas, onde a declividade chega à faixa de 45 a 75% e a altitude pode ultrapassar os 600 m, ocorrem em poucas regiões do estado, mas principalmente nas áreas dos domínios geológicos Estância e Domos Simão Dias e Itabaiana e no domínio geomorfológico Serras Resíduas. Nestas áreas a classe de potencial de degradação ambiental obtida foi muito alto.

De acordo com Bryan (2000), o transporte de sedimentos das vertentes para os vales onde ficam acessíveis para os processos fluviais é de central importância para a geomorfologia, e vários processos erosivos estão ativos nas vertentes como, por exemplo, a formação de ravinas. Segundo Morgan (2005) existem três forças que atuam sobre a partícula: a força vertical ou peso movendo a partícula verticalmente para baixo em direção à superfície do solo; a força de elevação que tende a fazer a ascensão da partícula verticalmente e; da força de arrasto exercida pelo fluxo da água movendo a partícula horizontalmente ao longo da superfície. As proporções relativas dessas três forças dependem do ângulo de inclinação.

Muitos autores relatam a importância da declividade para os processos erosivos, como: Gabriels, (1999); Bryan, (2000); Guerra & Marçal, (2007); Guerra e Mendonça, (2007); Fu et. al., (2011); Zhu et. al., (2011); Pelletier, (2012). Após cessada a capacidade de armazenar água do solo, esta tende a escorrer superficialmente, e sua velocidade é influenciada diretamente pela declividade. No entanto, Guerra & Mendonça (2007) citam que a declividade pode ser um fator importante para o processo erosivo, mas não há necessariamente uma correlação positiva à medida que a declividade aumenta, pois em encostas muito íngremes a erosão pode diminuir devido ao decréscimo de material disponível.

As informações referentes a declividades relacionadas com a ocorrência de erosões são indicativos fundamentais para o planejamento, seja em âmbito municipal, regional ou nacional,

pois serve como instrumento para análise e organização do espaço geográfico, no que se refere ao impacto sobre o ambiente proporcionado pela ação antrópica (Iensen, 2006).

Visto que nem sempre a erosão está relacionada a declividade, podendo as atividades antrópicas terem uma maior influência sobre os processos erosivos (Iensen, 2006; Pereira. et al, 2016). Sendo assim, é necessário manejar e conservar os recursos naturais em áreas onde ocorre intenso uso do solo e em declividades maiores que 30%, pois nessas áreas são identificados maiores números de ocorrências erosivas (Iensen; Werlang, 2008).

5.4.3. Aspectos pedológicos

Outra variável que tem influência mais acentuada sob os resultados é a pedologia, de acordo com a regressão linear e como pode ser observado pelos mapas de potencial de degradação ambiental do solo para os anos de 2000 e 2019 (Figuras 29 e 33) e pelo mapa pedológico de Sergipe (Figura 10). O tipo pedológico de maior extensão e que coincide com a classe de potencial de degradação muito alto são os Argissolos. Já para a classe de potencial alto, os solos mais frequentes são os Neossolos seguidos dos Planossolos. Os Neossolos também se fazem presentes em áreas em que a classificação de potencial de degradação ambiental do solo foi moderada.

De acordo com Neves et al. (2011), os Argissolos apresentam uma alta erodibilidade, sendo dessa forma, facilmente erodíveis. Os Argissolos apresentam boas características de agregação e estruturação, contudo, possuem obstáculos que impedem à infiltração da água ao longo do perfil, diminuindo sua permeabilidade e favorecendo o escoamento superficial, sendo susceptíveis aos processos erosivos (CUNHA; GUERRA, 1998).

Segundo o Atlas digital sobre recursos hídricos de Sergipe (SEMARH/SRH, 2014) os Neossolos predominantes no estado são os Neossolos Litólicos. Os Neossolos Litólicos são solos rasos ou muito rasos, exceto o chernozêmico, assentado diretamente sobre a rocha. A maior limitação desses solos é a pequena profundidade efetiva, que limita o desenvolvimento radicular das plantas e culturas, reduzindo a capacidade de sustentação delas, tanto mais expressiva quanto mais próximo a rocha estiver da superfície. Essas características conferem a esses solos pouca capacidade de sustentabilidade da vegetação. A condição de desmatamento ou de pouca cobertura vegetal, quando aliada às precipitações concentradas, facilita a formação de erosões laminares e em sulcos nesses solos (Shinzato et al. 2008).

Para Shinzato et al. (2008), os Neossolos Litólicos são muito susceptíveis à erosão em virtude da espessura reduzida e do relevo onde se localizam. A textura leve em superfície e o contato direto com a rocha a pequena profundidade tornam esses solos bastante susceptíveis

aos processos de escorregamento de massa, pois o rápido encharcamento do horizonte superficial e o excesso de água no plano de cisalhamento funcionam como lubrificante, facilitando a movimentação do material suprajacente a esse plano.

Os Planossolos são extremamente susceptíveis à erosão em decorrência da mudança textura abrupta, pouca profundidade, presença de íons de Sódio (Na), baixos teores de matéria orgânica, sendo uma classe de solo frequentemente encontrada nas áreas degradadas do semiárido (RIBEIRO; SAMPAIO; GALINDO, 2009). Cunha et al. (2010) afirmam que os Planossolos são muito susceptíveis aos processos erosivos de ação superficial, tal como erosão laminar, devido à presença de horizonte B textural com mudança textural abrupta de baixa permeabilidade, que favorece a geração de escoamento superficial, o que eleva seu grau de erodibilidade.

Um dos aspectos dos tipos de solo que são frequentemente avaliados em estudos de potencial de erosão do solo, perda de solo e degradação ambiental é a erodibilidade, como pode ser observado nos trabalhos de Castro et al. (2011); Eduardo et al. (2013); Corrêa et al. (2015); Kumar e Anbalagan (2015) e Jardim et al. (2017). Ao se observar o mapa de erodibilidade gerado para a área de estudo (Figura 13), nota-se que áreas no alto e médio sertão sergipano e no sul e centro sul sergipano apresentaram classificação de muito alta e alta erodibilidade, enquanto no restante do estado ocorrem as classes de muito baixa, baixa e moderada erodibilidade. Ao avaliar os tipos pedológicos das áreas onde ocorreram a classe de erodibilidade muito alta e alta, pode-se constatar que elas ocorreram em áreas onde os solos são do tipo Argissolos, Neossolos e Planossolos.

Salomão (1999) e Ross (2005) classificaram os Argissolos com um grau de erodibilidade variando de forte a muito forte, os Neossolos litólicos com grau de erodibilidade muito forte e os Planossolos com grau de erodibilidade muito fraco. Como pode ser observado pelos mapas de potencial de degradação ambiental do solo para os anos de 2000 e 2019 (Figuras 29 e 33) as áreas de alta e muito alta erodibilidade se encontram classificadas como tendo um potencial de degradação ambiental do solo variando entre moderado a muito alto. O que pode ocorrer é que nessas áreas a contribuição da variável erodibilidade é superparada pela contribuição de outras variáveis, como geologia e geomorfologia.

De acordo com Corrêa et al. (2015), alguns solos, quando em condições similares de chuva, declividade, cobertura vegetal e práticas de manejo, apresentam valores diferentes de perda. Isso ocorre, uma vez que a erodibilidade é resultante da interação entre as características físicas (textura, estrutura, permeabilidade e densidade), químicas, mineralógicas e biológicas do solo alterando a capacidade de regular a infiltração da água no solo, a desagregação e

desprendimento pelo impacto das gotas de chuva e a resistência ao transporte pelo escoamento superficial.

5.4.4. Aspectos pluviométricos

A variável precipitação também ocorre com maiores valores nas áreas classificadas como potencial muito alto, como pode-se observar ao comparar os mapas de potencial de degradação ambiental do solo para os anos de 2000 e 2019 (Figuras 29 e 33) e os mapas de pluviometria média para os anos de 2000 e 2019 (Figuras 12(a) e 12(b)) para o estado de Sergipe. À medida que se desloca do litoral para o interior do estado os volumes médios de chuva vão diminuindo. Esse comportamento acompanha a ocorrência das classes de potencial de degradação, que mudam de muito alto para muito alto e moderado, chegando a aparecer áreas de potencial baixo e muito baixo. Isso pode indicar a relação da precipitação para a intensificação das características de outras variáveis que venham a contribuir para a erosão, como a pedologia, geomorfologia e cobertura vegetal. Diversos estudos apontam para a relação da chuva com o processo de degradação e erosão do solo, como: Mohammad & Adam, 2010; Wei et. al., 2010; Zhongming et. al., 2010; Ghahramani et. al., 2011; Cui et. al., 2012; Jebari et. al., 2012; Liu et. al., 2012); Sobrinho (2015); Dechen et al. (2015); Almeida et al. (2016).

Os valores máximos de precipitação para a região classificada como potencial muito alto variam entre 1400 mm e 1650 mm para o ano 2000 e entre 1150 mm e 1400 mm para o ano 2019, como observa-se na Figura 12. Nas áreas em que a classificação de potencial alto de degradação pertenceu as classes, alto, moderado, baixo e muito baixo, os volumes variam de 650 a 1150 mm no ano 2000 e 650 a 1150 mm em 2019.

Para Guerra (2005), o início do processo erosivo se dá através da ação do *splash* (erosão por salpicamento das gotas da chuva), pois prepara as partículas que compõem o solo para serem transportadas pelo escoamento superficial. A ação das gotas de chuva causa a ruptura dos agregados do solo quando existentes, levando ao preenchimento dos poros e diminuindo a capacidade de infiltração do solo, promovendo a selagem da superfície.

De acordo com Cardoso et al. (2012), o impacto das gotas de chuva sobre a superfície do solo constitui o ponto inicial da erosão hídrica. Em localidades onde a erosividade da chuva é elevada e a superfície do solo se encontra desprovida de cobertura vegetal, pode ocorrer grande degradação com consequentes perdas de solo, água e nutrientes, fatores essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Por isso se faz importante a consideração dos

fatores cobertura do solo, representados pelas variáveis uso e cobertura do e pelo índice de vegetação EVI.

Segundo Santos et al. (2010), a degradação do solo se dá principalmente pelo arraste das partículas menores e mais ricas em nutrientes, culminando com decréscimo da fertilidade e, conseqüentemente, pela redução das produções ou pelas crescentes necessidades da reposição de fertilizantes e corretivos. Na maioria dos casos, as perdas de solo causadas pela erosão hídrica reduzem a espessura do solo, diminuindo a capacidade de retenção e redistribuição da água no perfil gerando, como consequência, maiores escoamentos superficiais e, por vezes, maiores taxas de erosão do solo.

Neste trabalho a variável precipitação foi formada por valores médios anuais para os anos estudados. No entanto, Wei et. al. (2010) preconizam que especial atenção deve ser dada para o tipo e intensidade de precipitação, pois possuem forte relação com o aspecto da erosividade da chuva. Contudo, segundo Guerra (2005), existem vários parâmetros que podem ser utilizados para medir a erosividade da chuva, como por exemplo: o total de precipitação, a média, a intensidade da chuva, o momento e a energia cinética. Entretanto o mais utilizado para avaliar as perdas de solo é a energia cinética (Guerra, 2005). Como demandaria muito tempo e esforço o cálculo, espacialização e transformação em dados matriciais das curvas de intensidade, duração e frequência (IDF) para o estado de Sergipe, optou-se pelos dados de chuva média. Os dados de precipitação são de fundamental importância e essa variável está relacionada ao comportamento do potencial de degradação de outras variáveis, como tipo de solo, declividade e cobertura vegetal.

5.4.5. Aspectos do uso e ocupação do solo

Dentre os diversos tipos de usos e ocupações do solo, a cobertura vegetal é um dos fatores de maior relevância nos estudos sobre erosão e degradação do solo. Diversos autores abordam essa relação como: Mohammad & Adam, 2010; Wei et. al., 2010; Zhongming et. al., 2010; Ghahramani et. al., 2011; Cui et. al., 2012; Jebari et. al., 2012; Liu et. al., 2012); Sobrinho (2015); Dechen et al. (2015); Almeida et al. (2016). Este fator foi representado neste trabalho pelas variáveis EVI e uso e cobertura do solo. Apesar das correlações encontradas pela regressão linear terem sido negativa fraca para o EVI e positiva fraca para o uso e cobertura do solo, isso não significa que em certas áreas do estado essas variáveis não contribuam fortemente para o potencial de degradação ambiental do solo. Como é o caso das áreas classificadas como de potencial de degradação muito alto.

Comparando-se os mapas de potencial de degradação ambiental do solo para os anos de 2000 e 2019 (Figuras 29 e 33) e os mapas de EVI (Figura 14) e uso e cobertura do solo (Figura 15), nota-se que as áreas classificadas como tendo um potencial muito alto de degradação ambiental do solo, são marcadas em sua maioria pela presença de usos e cobertura do solo como: pastagem, agricultura, mosaico agricultura/pastagem e infraestrutura urbana. É possível observar ainda (Figura 15) que as áreas de pastagem ocorrem em toda a extensão do estado, sendo frequentes também nas áreas em que as classes de potencial de gradação foram, alto, moderado, baixo e muito baixo. Nas áreas de agricultura algumas medidas de manejo do solo podem acabar incrementado ou reduzindo o potencial de degradação.

Para Maiato (2016) a agricultura convencional, baseada na mobilização do solo como forma de combater as infestantes e preparar a cama da semente, é a principal responsável pela degradação do solo a nível mundial, mas com particular incidência nas zonas tropicais. Nestas regiões não só a erosividade da chuva é muito elevada, como também a fertilidade dos solos está frequentemente muito associada ao seu teor de matéria orgânica. A agricultura convencional contribui para o seu desgaste não só pelo processo erosivo, mas também porque acelera a sua mineralização, ao mesmo tempo que restitui quantidades diminutas de resíduos orgânicos ao solo.

Uma das maneiras de enfrentar os problemas associados ao solo quando da utilização da agricultura convencional é a adoção de métodos de agricultura de conservação. Segundo Maiato (2016) a agricultura de conservação consiste num conjunto de práticas que permitem o manejo do solo agrícola com a menor alteração possível da sua composição, estrutura e biodiversidade natural, defendendo-o dos processos de degradação (erosão do solo e compactação). Algumas das técnicas que constituem a agricultura de conservação são os sistemas de sementeira direta (sem mobilização prévia do solo), sistemas de mobilização reduzida (sem inversão da camada superficial do solo) e os sistemas de mobilização na zona, visando a não incorporação ou a incorporação superficial dos resíduos das culturas, e o estabelecimento de cobertos vegetais vivos (espontâneos ou semeados de espécies apropriadas) em culturas arbustivas e/ou arbóreas, ou entre culturas anuais sucessivas.

Panachuki et al. (2011), afirmam que áreas com preparo convencional do solo e desprovidas de cobertura vegetal em superfície são mais suscetíveis à erosão hídrica, pois, este sistema favorece a formação do selamento superficial, caracterizado por uma fina camada de solo que se torna compactada pelo impacto direto da gota de chuva sobre o solo. No entanto, de acordo com Souza et al. (2005) e Engel et al. (2009), em sistemas considerados conservacionistas – como o plantio direto e a pastagem sob manejo adequado, com pouco ou

nenhum revolvimento do solo e que mantenham cobertura vegetal sobre a superfície –, a formação de agregados maiores e mais estáveis é favorecida, o que proporciona aumento da resistência do solo à erosão. Segundo Nacinovic et al. (2014), em áreas sob pastagem com alto percentual de cobertura, a rugosidade superficial do solo aumenta, favorece maior infiltração de água e, conseqüentemente, menor escoamento superficial (Amaral et al., 2008).

Diversos autores na literatura estudaram os efeitos de diferentes tipos de cobertura e manejo do solo em relação à erosão. Almeida et al. (2016) em seu trabalho intitulado Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo, constatou que: a redução da erosão do solo sob cultivo de soja está associada à adoção de sistemas de cultivo que não revolvam o solo e à elevada cobertura vegetal; a redução do índice de cobertura vegetal, associada ao revolvimento do solo, acelera a desagregação de suas partículas pela ação de chuvas.

Dechen et al. (2015) em seu estudo sobre perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo observou que: solos com 90% de cobertura reduzam as perdas médias de água em 51,97%, as de terra em 54,44% e as de matéria orgânica em 54,89% quando comparados com solos com 0% de cobertura; o maior percentual de cobertura do solo resultou em menores custos associados às perdas de água, terra e nutrientes por erosão e em solo sem cobertura, foram estimadas perdas de 16% de P_2O_5 e 8% de N em relação à quantidade de fertilizantes recomendada; os custos da erosão do solo associadas às perdas de fertilizantes para as taxas de 0%, 24%, 40% e 90% de cobertura do solo foram de, respectivamente, US\$ 107,76, US\$ 71,67, US\$ 35,38 e US\$ 18,15 por $ha^{-1}.ano^{-1}$.

Quanto a urbanização, de acordo com Brito et al. (2012), o processo de expansão urbana sem planejamento adequado e em locais inapropriados como encostas íngremes e áreas de mananciais podem resultar na degradação da cobertura vegetal e dos recursos naturais solo e água. É evidente o estabelecimento de loteamentos e invasões em áreas inadequadas, o lançamento das águas pluviais canalizadas em locais inapropriados e a intensificação do processo de impermeabilização do solo. Uma das conseqüências desses procedimentos é o surgimento de quadros erosivos urbanos.

Em Sergipe, as maiores cidades do estado incluindo sua capital, Aracaju, estão localizadas na área costeira do estado, onde a classe de potencial de degradação muito alto foi predominante. Para Catro et al. (2011), assim como em todo Brasil, as pressões socioeconômicas na zona costeira vêm desencadeando, ao longo do tempo, processos acelerados de urbanização não planejada e intensa degradação dos recursos naturais, ameaçando a sustentabilidade econômica e a qualidade ambiental e de vida das populações humanas.

Na literatura é possível encontrar trabalhos que tratam da temática urbanização versus erosão na área costeira do estado de Sergipe. Rodrigues et al. (2017), em seu estudo sobre a expansão urbana e dinâmica marinha da praia da costa no município de Barra dos Coqueiros em Sergipe, constataram que em virtude da expansão urbana em direção à linha de costa, já ocupando em alguns casos a zona de espraçamento, pode trazer mudanças na dinâmica costeira local. A ocupação dos terraços arenosos, dificultando os processos de infiltração, e as alterações da dinâmica hídrica natural, com os empreendimentos instalados nas zonas úmidas, torna esta região ainda mais vulnerável à inundação. Além disso, a retirada da vegetação e alteração na morfologia das dunas frontais diminui a proteção natural à sua retaguarda.

Mota e Souza (2018), em seu trabalho de avaliação da vulnerabilidade à erosão costeira e riscos associados à ocupação para o município de Aracaju, observaram que grande parte da área estudada está inserida nos graus médio e alto de risco, em razão da proximidade da ocupação da linha de costa associada ao comportamento do ambiente praiado. A única área classificada como risco baixo encontra-se às margens da desembocadura do rio Vaza-Barris, que mesmo apresentando elevada variabilidade morfodinâmica, apresenta índices muito baixos de ocupação.

5.5. Mudança das classes de potencial de degradação ambiental do solo

Os resultados para as mudanças ocorridas nas classes de potencial de degradação ambiental do solo, entre os anos de 2000 e 2019, geradas para a área de estudo, apontam para uma permanência de maior parte da área (68,45%) sem mudanças. No entanto, nas áreas em que houve mudança, as mesmas foram para classes de maior potencial de degradação. A Tabela 15 apresenta de maneira geral o comportamento das mudanças ocorridas nas classes, separadas em três tipos de mudança, mudanças para pior, sem mudança e mudança para melhor.

Tabela 15 - Tipos de mudanças nas classes de potencial de degradação e suas áreas.

	Porcentagem (%)	Área (km²)	Área (ha)
Mudou para pior	17,66	3818,55	381855,27
Sem mudança	68,45	14796,17	1479617,31
Mudou para melhor	13,87	2999,11	299911,72

Avaliando as mudanças ocorridas em cada uma das classes de potencial de degradação ambiental do solo, foi possível observar que as classes que sofreram mais mudança em suas

áreas foram: alto, muito alto, moderado, baixo e muito baixo respectivamente, como nota-se a partir da Tabela 16. É possível constatar que a mudança ocorrida para pior na classificação das áreas, foi gerada pelo aumento das áreas classificadas como potencial de degradação moderado e muito alto. Já a mudança nas classes para melhor, foi provocada pelo aumento na classe muito baixo e redução da classe de alto potencial de degradação.

Tabela 16 - Área das classes de potencial de degradação do solo em 2000 e 2019 e suas diferenças.

	2000	2019	2000	2019	Diferença (ha)
	Porcentagem (%)	Porcentagem (%)	Área (ha)	Área (ha)	
Muito baixo	0,18	0,28	3349,31	6014,54	2065,22
Baixo	1,70	1,59	36717,91	34456,92	2251,99
Moderado	9,14	11,10	197818,99	240293,34	42474,35
Alto	45,11	40,53	976836,87	877727,71	99109,17
Muito alto	43,87	46,51	950027,91	1007177,03	57149,13

A Figura 35, apresenta o mapa das áreas em que se estimou terem ocorrido mudanças nas classes de potencial de degradação ambiental do solo. É possível constatar neste mapa, assim como nos mapas gerados com diferentes valores do expoente *gamma*, incluindo o tomado como referência (*gamma* igual a 0,6), a marcante influência dos fatores que mais influenciaram os resultados, ou seja, as variáveis mais influentes, geologia, geomorfologia, pedologia e precipitação. Visto que as áreas situadas na região costeira do estado, que foram classificadas como tendo um potencial de degradação ambiental do solo muito alto, foram as mesmas áreas onde não ocorreram mudanças nas classes. Estas áreas são marcadas pelas influências dos domínios geológicos e geomorfológicos, tipos de solos, volumes de precipitação e usos e ocupações do solo com características favoráveis a degradação ambiental do solo, como foi discutido anteriormente.

As áreas onde houve melhoria nas classes de potencial de degradação ambiental do solo coincidiram em sua maioria com as áreas classificadas como possuindo um potencial de degradação entre moderado e baixo. Estas áreas estão localizadas onde os fatores mais influenciadores na degradação ambiental do solo possuem características menos intensas ou que contribuam menos para os processos que desencadeiam a degradação ambiental. Como por exemplo, menores valores de precipitação, menor presença de áreas de urbanização e de

agricultura e ainda domínios geológicos e geomorfológicos menos propensos a degradação ambiental do solo.

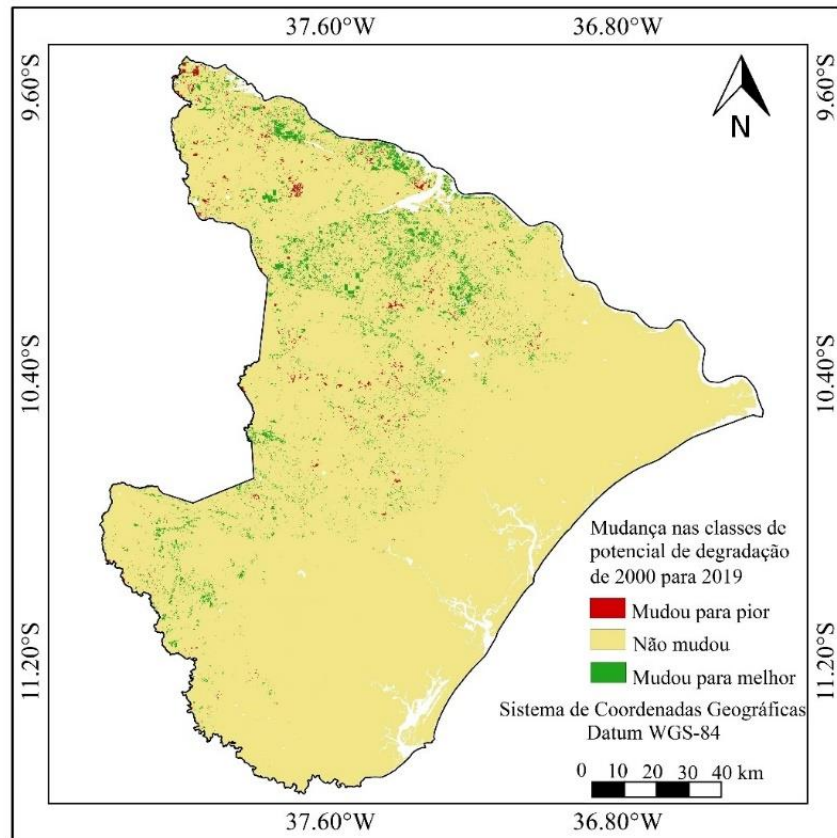


Figura 35 - Mapa de áreas onde ocorreram mudança na classificação do potencial de degradação ambiental do solo.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De modo geral, para todos os cenários obtidos a partir de diferentes valores atribuídos ao expoente gamma, os resultados apontam para uma predominância das classes alto e muito alto potencial de degradação para os dois anos estudados. As variáveis, geologia, geomorfologia, pedologia e precipitação foram as que demonstraram maior influência na estimativa do potencial de degradação.

Comparados os dois períodos avaliados e as diferenças entre em cada uma das classes de potencial de degradação ambiental do solo, foi possível observar que as classes que sofreram mais mudança em suas áreas foram: alto, muito alto, moderado, baixo e muito baixo respectivamente. A mudança ocorrida para pior na classificação das áreas, foi gerada pelo aumento das áreas classificadas como potencial de degradação moderado e muito alto. Já a mudança nas classes para melhor, foi provocada pelo aumento na classe muito baixo e redução da classe de alto potencial de degradação.

A metodologia aplicada pode ser considerada promissora, gerando mapas temáticos finais capazes de estimar o potencial de degradação ambiental do solo, os quais podem ser considerados produtos técnicos geradores de subsídio ao manejo, uso e ocupação do solo e dos recursos hídricos superficiais para a área de estudo. O produto final aponta as regiões que reúnem maior ou menor influência dos fatores de promoção de processos que culminem na degradação e erosão do solo. Portanto, é altamente relevante que medidas de prevenção e mitigação de processos de degradação do solo sejam adotadas para tais áreas do estado de Sergipe.

A aplicação do modelo apresentado neste trabalho pode ser utilizada apenas na fase de planejamento ambiental, pois pode não representar a realidade de campo e por isso não substitui as verificações de campo quando forem tomadas as decisões de forma pontual, mostrando, portanto, as áreas que merecem atenção especial. Por isso, recomenda-se para o aprimoramento da metodologia aqui proposta, uma etapa de verificação *in situ* de locais com potencial de degradação ambiental do solo, servindo ainda para a validação do modelo a partir dos dados coletados. Recomenda-se ainda a divisão da área de estudos em subáreas como bacias hidrográficas ou territórios administrativos.

Mesmo sendo a lógica *fuzzy* um método de complexo entendimento e aplicação, as vantagens evidentes são a menor subjetividade na determinação de pesos relativos, uma vez que para a maioria dos dados os valores foram transformados a partir das funções lineares e sigmoidal. Apesar das limitações do modelo apontadas aqui, acredita-se que o resultado final é

um bom indicativo de áreas com potencial à degradação dos solos, e pode ser utilizado para tomada de decisão na elaboração de planos e programas de prevenção e controle da degradação ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F.F.M. O Cráton do São Francisco. Rev. Brás. Geociências, v.7, p.349-364. 1977.
- ALMEIDA, W.S., CARVALHO, D.F., PANACHUKI, E., VALIM, W.D., RODRIGUES, S.A., VARELLA, C.A.A. Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. Pesquisa agropecuária brasileira, Brasília, v. 51, n. 9, p. 1110-1119, 2016.
- ALMEIDA, W.S., de CARVALHO, D.F., PANACHUKI, E., VALIM, W.D., RODRIGUES, S.A., VARELLA, C.A.A. Erosão hídrica em diferentes sistemas de cultivo e níveis de cobertura do solo. Pesquisa agropecuária brasileira, v. 51, n. 9, p. 1110-1119, 2016.
- ALVES, H.P.F. Vulnerabilidade socioambiental na metrópole paulistana: uma análise sociodemográfica das situações de sobreposição espacial de problemas e riscos sociais e ambientais. Revista Brasileira de Estudos Populacionais, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 43-59. 2006.
- AMARAL, A.J., do BERTOL, I., COGO, N.P., BARBOSA, F.T. Redução da erosão hídrica em três sistemas de manejo do solo em um Cambissolo Húmico da região do Planalto Sul-Catarinense. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, p. 2145-2155, 2008.
- AMIRAHMADI, A., SHIRAN, M., ASADI, M.Z., KERAMATI, F. Landslide susceptibility zonation using the *fuzzy* algebraic operators in GIS, Iran. Journal of Materials and Environmental Science v. 8, n. 1, p. 50-59. 2017.
- AMIRAHMADI, A., SHIRAN, M., ZANGANEH ASADI, M., KERAMATI, F. Landslide susceptibility zonation using the *fuzzy* algebraic operators in GIS, Iran. J. Mater. Environ. Sci. v. 8, n. 1, p. 50-59. 2017.
- ARAGÃO, R., ALMEIDA, J.A.P., FIGUEIREDO, E.E., SRINIVASAN, V.S. Mapeamento do potencial de erosão laminar na Bacia do Rio Japarutuba, SE, via SIG. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 15, n. 7, p. 731–740, 2011.
- ARAI, M. A grande elevação eustática do mioceno e sua influência na origem do Grupo Barreiras. Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 6, n. 2, p. 1-6, 2006.
- BALAMURUGAN, G., RAMESH, V., TOUTHANG, M. Landslide susceptibility zonation mapping using frequency ratio and *fuzzy gamma* operator models in part of NH-39, Manipur, India. Nat Hazards. v. 84, p. 465–488. 2016.

BALSAN, R. Impactos Decorrentes da Modernização da Agricultura Brasileira. CAMPOTERRITÓRIO: Revista de Geografia Agrária, Francisco Beltrão, v. 1, n. 2, p. 123-151. 2006

BITTENCOURT, A.C.S.P., MARTIN, L., DOMINGUEZ, J.M.L., FERREIRA, Y.A. Evolução paleogeográfica quaternária da costa do Estado de Sergipe e da costa sul do Estado de Alagoas. Revista Brasileira de Geociências, v. 13, n. 2, p.93-97, 1983.

BLUM, W.E.H. Basic concepts: degradation, resilience and rehabilitation. In: LAL, R., BLUM, W. H., VALENTINE, C., STEWART, B. A. (Ed.) Methods for assessment of soil degradation. New York, CRC Press. p.1-16. 1998.

BONHAM-CARTER, G.F. Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. Elsevier Butterworth-Heine-mann, Oxford, p.292–302. 1994.

BRADY, N.C. The Nature And Properties Of Soils. Trad. Antônio B. Neiva Figueiredo, 7ª ed. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 878p. 1989.

BRASIL, Lei nº 6.938. Política Nacional do Meio Ambiente. Brasília, 31 de agosto de 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6938.htm>. Acesso em: abr. 2020.

BRASIL, Lei nº 9.433. Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, 8 de janeiro de 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm. Acesso em: mar. 2020.

BRITO, A.O., MARTINS, I.S., AICHA, N.N. Estudos da erosão urbana no Distrito Federal. Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal, v. 20, n. 1, p. 85-92, 2012.

BRYAN, R. B. Soil Erodibility and Processes of Water Erosion on Hillslope. Geomorphology, 32, p. 385-415, 2000.

BURROUGH, P.A. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Clarendon Press, Oxford. 193p. 1987.

CÂMARA, G., DAVIS, C., MONTEIRO, A.M.V. Introdução à ciência da geoinformação. INPE, São José dos Campos, 2001. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf>. Acesso em: ago. 2020.

CANAVESI, V., CAMARINHA, P.I.M., ALGARVE, V.R., CARNEIRO, R.L.C., ALVALÁ, R.C.S. Análise da susceptibilidade a deslizamentos de terra: estudo de caso de Paraibuna, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16 (SBSR). Foz do Iguaçu. Anais ... São José dos Campos: ... São José dos Campos: INPE, p. 5251-5258, 2013.

CARVALHO, M.E.S. & FONTES, A.L. Caracterização geomorfológica da Zona Costeira do Estado de Sergipe. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6, Anais... – CD/ ROM, UGB, Goiânia – GO, 15p. 2006.

CASTRO, J.W.A., FERNANDES, D., DIAS, F.F. Monitoramento do Processo de Erosão Costeira na Praia das Tartarugas, Rio das Ostras - Estado do Rio de Janeiro. Revista de Gestão Costeira Integrada, v. 11, n. 3, p. 355-368, 2011.

CASTRO, W.J., CASTRO, M.L.L., LIMA, J.O., OLIVEIRA, L.F.C., RODRIGUES, C., FIGUEIREDO, C.C. Erodibilidade de solos do cerrado goiano. Revista em Agronegócios e Meio Ambiente, v.4, n.2, p. 305-320, 2011.

CERDÀ, A., KEESSTRA, S.D., RODRIGO-COMINO, J., NOVARA, A., PEREIRA, P., BREVIK, E., JORDÁN, A. Runoff initiation, soil detachment and connectivity are enhanced as a consequence of vineyards plantations. J. Environ. Manag. 202, p. 268–275. 2017.

COHEN, S., SVORAY, T., LARONNE, J. B., ALEXANDROV, Y. *Fuzzy-Based Dynamic Soil Erosion Model (FuDSEM): Modelling Approach And Preliminary Evaluation*. Journal of Hydrology, 356, p. 185-198. 2008.

CORRÊA, E.A., MORAES, I.C., PINTO, S.A.F. Estimativa da erodibilidade e tolerância de perdas de solo na região do centro leste paulista. Geociências, São Paulo, v. 34, n. 4, p.848-860, 2015.

COSTA, O.A., SANTOS, D.N. dos. Influência da ZCAS e ZCIT e seus efeitos de inundações nas bacias hidrográficas no estado de Sergipe, abril de 2010. In: EN-CONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE, 4, Aracaju. Anais eletrônicos... Aracaju: Embrapa, CPTAC, 2011. 23 a 25 de março de 2011, Aracaju/SE.

CREPANI, E., MEDEIROS, J. S., FILHO, P. H., FLORENZANO, D. V., BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial. São José dos Campos INPE. 2001.

CUI, X., LIU, S., WEI, X. Impacts of Forest Changes on Hydrology: A Case Study of Large Watersheds in the Upper Reach of Yangtze River Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, v. 9, p. 6507-6531. 2012.

D'EL-REY SILVA, L.J.H. Basin infilling in the southern-central part of the Sergipano Belt (NE Brazil) and implications for the evolution of Pan-African/Brasiliano cratons and Neoproterozoic cover. *Journal of South American Earth Sciences* v. 12, p. 453-470. 1999.

D'EL-REY SILVA, L.J.H. Tectonic evolution of the Sergipano Belt, NE Brazil. *Revista de Geociências*, v.25, p.315-332. 1995.

D'EL-REY SILVA, L.J.H., MCCLAY, K.R. Stratigraphy of the southern part of the Sergipano Belt, NE Brazil: tectonic implications. *Revista Brasileira de Geociências* v.25, p.185-202. 1995.

DANTAS, M.E., SHINZATO, E. Origem das paisagens de Sergipe. In: CARVALHO, L.M., MARTINS, V.S. *Geodiversidade do estado de Sergipe*. 1. Ed, Salvador: CPRM – Serviço geológico do Brasil. Cap. 3, p. 35-48. 2017.

DECHEN, F., CARMELA, S., TIAGO, S.T., MARIA, F.G, ISABELLA, C.D. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. *Bragantia*, v. 74, n. 2, p. 224-233, 2015.

DECHEN, S.C.F, TELLES, T.S., GUIMARÃES, M.F., DE MARIA, I.C. Perdas e custos associados à erosão hídrica em função de taxas de cobertura do solo. *Bragantia*, Campinas, v. 74, n. 2, p.224-233, 2015.

DEMIR, G., AYTEKIN, M., AKGUN, A., IKIZLER, S.B., TATAR, O. A comparison of landslide susceptibility mapping of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone (Turkey) by likelihood-frequency ratio and analytic hierarchy process methods. *Nat Hazards* v. 65, p.1481–1506. 2013.

DIDAN, K., MUNOZ, A.B., SOLANO, R, HUETE, A. MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). The University of Arizona, 2015. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/documents/103/MOD13_User_Guide_V6.pdf>. Acesso em: abr. 2020.

DINIZ, M.T.M., MEDEIROS, S.C., CUNHA, C.J. Sistemas atmosféricos atuantes e diversidade pluviométrica em Sergipe. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 34, n. 1, p. 17-34, 2014.

DIONE P. CARDOSO, D.P., SILVA, M.L.N., CARVALHO, G.J., FREITAS, D.A.F., C. AVANZI, C. Plantas de cobertura no controle das perdas de solo, água e nutrientes por erosão hídrica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 16, n. 6, p. 632-638, 2012.

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. encabeçamento sul da ponte sobre o rio São Francisco. 2017. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/anexo/outros/outros_edital0163_18-21_3.pdf>. Acesso em: mar. 2020.

DOMINGUEZ, J.M.L., BITTENCOURT, A.C.S.P., MARTIN, L. Sobre validade de utilização do termo delta para designar planícies costeiras associadas as desembocaduras dos grandes rios brasileiros. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32., 1992, Salvador. Anais... Salvador: AGB, 1992, p.49-58.

EDUARDO, E.E., CARVALHO, D.F., MACHADO, R.L., SOARES, P.F.C., ALMEIDA, W.A. Erodibilidade, fatores cobertura e manejo e práticas conservacionistas em argissolo vermelho-amarelo, sob condições de chuva natural. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, v. 37, p. 796-803, 2013.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA, SNLCS. 247 p. 1979.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, Brasília: Sistema de Produção de Informação, 2006. 306 p.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Base de dados para o Estado de Sergipe: referenciais de solos para o desenvolvimento. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2014. (DVD).

ENGEL, F.L., BERTOL, I., RITTER, S.R., PAZ GONZÁLEZ, A., PAZ-FERREIRO, J., VIDAL VÁZQUEZ, E. Soil erosion under simulated rainfall in relation to phenological stages of soybeans and tillage methods in Lages, SC, Brazil. *Soil and Tillage Research*, v. 103, p. 216-221, 2009.

ERCANOGLU, M., GOKCEOGLU, C. Use of *fuzzy* relations to produce landslide susceptibility map of a landslide prone area (West Black Sea Region, Turkey). Eng Geol v. 75, p.229–250. 2004.

ESWARAN, H., LAL, R., REICH, P. F. Land Degradation: An Overview. In: BRIDGES, E. M., HANNAM, I. D., OLDEMAN, L. R., PENING DE VRIES, F. W. T., SCHERR, S. J., and SOMPATPANIT, S. (eds.). Responses to Land Degradation. Proc. 2nd. International Conference on Land Degradation and Desertification, Khon Kaen, Thailand. Oxford Press, New Delhi, India. 2001.

FERNANDES, J. D, MEDEIROS, A. J de. Desertificação no Nordeste: Uma aproximação sobre o fenômeno do Rio Grandes do Norte. Holos, 25, v.3. 2009.

FIGUEIREDO FILHO, D. B., ROCHA, E. C., SILVA JR, J., PARANHOS, R, A., NEVES, J. A. B, SILVA, M. B. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson: o Retorno. Leviathan: Cadernos de Pesquisa Política, n. 8, p. 66-95, 2014.

FIGUEIREDO, M.C.B., TEIXEIRA, A.S., PEREIRA, A.L. F., ROSA, M. F., PAULINO, W. D., MOTA, s., ARAÚJO, J.C. Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Reservatórios à Eutrofização. Engenharia sanitária e ambiental, v. 12, n. 4, p. 399-409. 2007.

FLAUZINO, F.S., SILVA, M.K.A., NISHIYAMA, L., ROSA, R. Geotecnologias aplicadas à gestão dos recursos naturais da bacia hidrográfica do rio Paranaíba no cerrado mineiro. Sociedade & Natureza, Uberlândia, v.22, n.1, p.75-91, 2010.

FLORENZANO, T.G. Imagens de satélite para estudos ambientais. São Paulo, Oficina de Textos. 97 p. 2002.

FRANÇA, A., de SOUZA, F. J., MARQUES, M. Avaliação Do Potencial À Erosão Dos Solos: Uma Análise por Lógica *Fuzzy* e Sistemas De Informações Geográficas. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Campo Grande, MS. 2005.

FU, S., LIU, B., LIU, H., XU, L. The Effect of Slope on Interrill Erosion at Short Slopes. Catena, 84, p. 29-34. 2011.

FULLEN, M.A.E., CATT, J.A. Soil management – problems and solutions. Oxford, Oxford University Press. 2004.

- GABRIELS, D. The Effect of Slope Length on the Amount and Size Distribution of Eroded Silt Loam Soils: Short Slope Laboratory Experiments on Interrill Erosion. *Geomorphology*, v. 28, p. 169-172. 1999.
- GAO, X., HUETE, A. R., NI, W., & MIURA, T. Optical–biophysical relationships of vegetation spectra without background contamination. *Remote Sensing of Environment*, v. 74, p. 609– 620. 2000.
- GHAHRAMANI, A., ISHIKAWA, Y., GOMI, T., SHIRAKI, K., MIYATA, S. Effect of Ground Cover on Splash and Sheetwash Erosion over a Steep Forested Hillslope: A Plot-Scale Study. *Catena*, v. 85, p. 34-47. 2011.
- GOMES, H.F., ALVES, L.E.R., SANTOS, F.S., BARROS, G.V.P., SILVA, R.A. Geotecnologias: princípios e aplicações meteorológicas. In: NUNES, A.B., MARIANO, G.L. *Meteorologia em tópicos*. 1. Ed, Maceió: Clube dos Autores, 2020. Cap. 4, p. 166-199. 2020.
- GOMEZ, H., KAVZOGLU, T. Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River Basin, Venezuela. *Eng Geol* v.78, p.11–27. 2005.
- GUERRA, A.J.T.; MARÇAL, M.S. *Geomorfologia Ambiental*. Bertrand Brasil, 1ª ed., Rio de Janeiro. 2007.
- GUERRA, A.J.T., MENDONÇA, J.K.S. Erosão dos Solos e a Questão Ambiental. In: VITTE, A.C., GUERRA, A.J.T. (Org), *Reflexões Sobre a Geografia Física no Brasil*. Bertrand Brasil, 2a ed., Rio de Janeiro, p.153-188. 2007.
- GUERRA, A.J.T. O Início do Processo Erosivo. In: GUERRA, A.J.T., SILVA, A.S., BOTELHO, R.G.M. (Org), *Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, temas e aplicações*. Bertrand Brasil, 2a ed., Rio de Janeiro, p.17-50. 2005.
- GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: CUNHA, S.B. e GUERRA, A.J.T. (Org). *Geomorfologia - exercícios, técnicas e aplicações*. Rio de Janeiro, Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 3ª edição, p. 139-155. (2009b).
- GUERRA, A.J.T. Processos erosivos nas encostas. In: GUERRA, A.J.T. e CUNHA, S.B. (Org.). *Geomorfologia - uma atualização de bases e conceitos*. Rio de Janeiro, Editora Bertrand Brasil, 8ª edição, p. 149-209. (2009a).
- GUERRA, A.T, GUERRA, A.J.T. *Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 652 p. 2008.

- GUERRA, A.T.J, JORGE, M.C.O. Geomorfologia do cotidiano – A degradação dos solos. Revista GEONORTE, Edição Especial, v.4, n.4, p.116 – 135, 2012.
- GUERRA, A.T.J, JORGE, M.C.O. Geomorfologia do cotidiano – A degradação dos solos. Revista GEONORTE, Edição Especial, v.4, n.4, p.116 – 135, 2012.
- HAIDARA, I., TAHRI, M., MAANAN, M., HAKDAOUI, M. Efficiency of *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* to detect soil erosion vulnerability. *Geoderma*. v. 354. 2019.
- HASSET, J.J. E BANWART, W.L. (1992). *Soils and their environment*. New Jersey: Prentice Hall.
- HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE*, v. 69, n. 1, p. 14–47, 1981. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1456186/>>. Acesso em: mai. 2020.
- HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X., FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation índices. *Remote Sensing of Environment* v. 83, p. 195–213. 2002.
- IBGE. Contagem da População (2010). Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em abr. 2020.
- IPCC - Working Group II Contribution to AR5, 2014. *Climate Change. IPCC Working Group II, Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, pp. 2014.
- JAAFARI, A., NAJAFI, A., POURGHASEMI, H.R., REZAEIAN, J., SATTARIAN, A. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* v.11, p.909–926. 2014.
- JAGABANDHU, R., SUNIL, S. GIS-based Gully Erosion Susceptibility Evaluation Using Frequency Ratio, Cosine Amplitude and Logistic Regression Ensembled with *fuzzy* logic in Hinglo River Basin, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. v. 15. 2019.
- JARDIM, A.M.R.F., ARAÚJO JÚNIOR, G.N., SILVA, M.J., MORAIS, J.E.F., SILVA, T.G.F. Estimativas de perda de solo por erosão hídrica para o município de Serra Talhada, PE. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, v. 2, n. 3, p. 186-193, 2017.

JEBARI, S. B, BERNDTSSON, R, OLSSON, J., BAHRI, A. Soil Erosion Estimation Based on Rainfall Disaggregation. *Journal of Hydrology*, v. 436 - 437, p. 102-110. 2012.

KESSTRA, S., NUNES, J., NOVARA, A., FINGER, D., AVELAR, D., KALANTARI, Z., CERDÀ, A. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of The Total Environment*, v. 610, p. 997-1009, 2018.

KOBIYAMA, M., MINELLA, J.P., FABRIS, R. Áreas degradadas e sua recuperação. *Belo Horizonte*, v. 22. n. 210, p.10-17. 2001.

KUMAR, R., ANBALAGAN, R. Landslide susceptibility zonation in part of Tehri reservoir region using frequency ratio, *fuzzy* logic and GIS. *Journal of Earth System Science* v. 124, n. 2, p. 431–448, 2015.

KUMMEROW, C., BARNES, W., KOZU, T., SHIUE, J., SIMPSON, J. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, v. 15, p. 809–817. 1998.

LADEIRA, M.B. Uso da função sigmóide para desagregação do bloco de tormenta obtido da curva IDF estudo de caso: bacia de Val-de-Cans. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Mestrado, UFPA, Belém (PA), 2011. 148 f.

LEE, S. Application and verification of *fuzzy* algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environ. Geol.* v.52, p.615– 623. 2007.

LIU, Y., FU, B., LU, Y., WANG, Z., GAO, G Hydrological Responses and Soil Erosion Potential of Abandoned Cropland in the Loess Plateau, China. *Geomorphology*, v. 138, p. 404-414. 2012.

LOBÃO, J.S.B., ROCHA, W. de J.S. da F; SILVA, A. de B. Utilização De Lógica *Fuzzy* Na Modelagem De Vulnerabilidade À Erosão No Município de Morro Chapéu – BA. In: III SIMPÓSIO REGIONAL DE GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO, Anais, Aracaju – SE. 2006.

LOUZADA, A. Gestão ambiental, conceitos e definições. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABQDYAJ/gestao-ambiental-conceitos-definicoes>>. Acesso em: mai. 2020.

Luana Santos Oliveira MOTA, L.S.O., SOUZA, R.M. Vulnerabilidade à erosão costeira e riscos associados à ocupação: estudo de caso do município de Aracaju/Sergipe, v. 1, n. 25, p. 89-102, 2018.

MACHADO, C.A. 2012. Desmatamentos e queimadas na região Norte do Estado do Tocantins. *Revista caminhos de Geografia*, v. 13, n. 43. 2012.

MAIATO, A.G.T. O papel da agricultura de conservação na luta contra a erosão do solo em particular em Angola. Tese (Mestrado em Engenharia Agrônômica) – Escola de Ciências e Tecnologia – Mestrado, Universidade de Évora, Évora, Angola, 53 f., 2016.

MANNIGEL, A.R, CARVALHO, M.P., MORETI, D., MEDEIROS, L.R. Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum Maringá*, v. 24, n. 5, p. 1335-1340, 2002.

MARQUES, J. R. Meio, ambiente urbano–2ª Ed. Rio de Janeiro: Forense Universitária, 233 p. 2010.

MARTINS, M. Coeficiente de correlação amostral, *Revista de Ciência Elementar*, v. 2, n. 42, p. 151-154, 2014.

MATSUSHITA, B., YANG W., CHEN, J., ONDA, Y., QIU, G. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest. *Sensors*, v.7, p.2636-2651. 2007.

MELO, A.B.C.; CAVALCANTI, I. F de A.; SOUZA, P. P. Zona de Convergência Intertropical do Atlântico. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J.; DIAS, M.A.F.S. (Orgs.). *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, p. 26-42, 2009.

MENDONÇA, F., DANNI-OLIVEIRA, I. M. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MENEGUZZO, I.S, CHAICOUSKI, A. Reflexões acerca dos conceitos de degradação ambiental, impacto ambiental e conservação da natureza. *Revista Geografia, Londrina – PR*, v. 9, n. 1, p. 181-185, 2010.

MENEZES, P.R. (Org.), ALMEIDA, T. (Org.). *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Brasília: UNB/Cnpq, 2012. 266p. Disponível em:< 31

<http://www.cnpq.br/documents/10157/56b578c4-0fd5-4b9f-b82a-e9693e4f69d8>>. Acesso em jun. 2020.

METTERNICHT, G., GONZALEZ, S. FUERO: Foundations of a *Fuzzy* Exploratory Model for Soil Erosion Hazard Prediction. *Environmental Modelling & Software*, v. 20, p. 715-728. 2005.

MIRANDA, J. I. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 425p.

MITRA, B., SCOTT, H.D., DIXON, J.C., McKIMMEY, J.M. Applications Of *Fuzzy* Logic To The Prediction Of Soil Erosion In A Large Watershed. *Geoderma*, v.86, p.183-209. 1998.

MOHAMMAD, A.G., ADAM, M.A. The Impact of Vegetative Cover Type on Runoff and Soil Erosion under Different Land Uses. *Catena*, v. 81, p.97-103. 2010.

MOHAMMAD, A.G., ADAM, M.A. The Impact of Vegetative Cover Type on Runoff and Soil Erosion under Different Land Uses. *Catena*, v.81, p.97-103. 2010.

MOLION, L.C.B., BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, Rio de Janeiro, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MORGAN, R P.C. Soil Erosion and Conservation. Third Edition. National Soil Resources Institute, Cranfield University. 2005.

MORGAN, R. P. C. Soil Erosion and Conservation. 3. ed. National Soil Resources Institute, Cranfield University, 2005.

NACINOVIC, M.G.G., MAHLER, C.F., AVELAR, A. de S. Soil erosion as a function of different agricultural land use in Rio de Janeiro. *Soil and Tillage Research*, v.144, p.164-173, 2014.

NASCIMENTO, P.S.R., PETTA, R. A. Confecção do mapa de densidade de drenagem através de geotecnologias visando definir a vulnerabilidade aos processos erosivos na sub-bacia do baixo Piracicaba (SP). *Estudos Geográficos*, v.6, n., p.19–34, 2008.

NEVES, S. M. A da S., MONTINHO, M. C., NEVES, R. J., SOARES, E. R. C. Estimativa da perda de solo por erosão hídrica na Bacia Hidrográfica do rio Jauru/MT. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, v. 23, n. 3, p. 423-433, 2011.

OLDEMAN, L.R., HAKKELING, R.T.A., SOMBROEK, W.G. World map of the status of human-induced soil degradation. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC)/UNEP in cooperation with Winand Staring Centre-International Soil Science Society (ISSS)-FAO-ITC (The International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation). 1990.

OLDEMAN, L.R., LYNDEN, G.W.J. Revisiting the GLASOD methodology. In: LAL, R., BLUM, W.H., VALENTINE, C., STEWART, B.A. (Ed.). Methods of assessment of soil degradation. New York. CRC Press. p. 423-440. 1998.

OLIVEIRA, E.P., WINDLEY, B. F., ARAÚJO, MARIO N.C. The Neoproterozoic Sergipano orogenic belt, NE Brazil: A complete plate tectonic cycle in western Gondwana. *Precambrian Research* v.181, p.64–84. 2010.

PANACHUKI, E., BERTOL, I., ALVES SOBRINHO, T., OLIVEIRA, P.T.S. de RODRIGUES, D.B.B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 1777-1785, 2011.

PARROTA, J. A. The role of plantattino forest in degraded tropical ecosystems. *Agriculture Ecosystems and Environment*, Amsterdam. v. 41, p.115-133, 1992.

PARROTA, J.A. The role of plantationforest in rehabilitation degraded tropical ecosystems. *Agriculture Ecosystems and Environment*. Amsterdam, v. 41, p. 115-133. 1992.

PELLETIER, J. D. Fluvial and Slope Wash Erosion of Soil Mantled Landscapes: Detachment or Transport Limited? *Earth Surface Processes and Landforms* v. 37, p. 37–51. 2012.

POLETO, C. Introdução ao gerenciamento ambiental. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 2009.

POURGHASEMI, H.R., PRADHAN, B., GOKCEOGLU, C. Application of *fuzzy* logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Nat Hazards*, v.63, p.965–996. 2012.

PRADHAN, B. Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, *fuzzy* logic and multivariate logistic regression approaches. *J. Indian Soc. Remote Sens* v. 38, n. 2, p.301–320. 2010.

PRADHAN, B., LEE, S., BUCHROITHNER, M.F. Use of geospatial data and *fuzzy* algebraic operators to landslide-hazard mapping. *Applied Geomatics*, v. 1, n. 1, p. 3-15. 2009.

REINERT, D.J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris. In: DIAS, L.E., GRIFFITH, J.J. (Ed.). Recuperação de áreas degradadas. Viçosa, UFV. p.163-176, 1998.

REZENDE, O.L.T., LORENZONI, L.L., SUANO JUNIOR, F.C., MARIA ALICE VEIGA SOUZA, M.A.V.F. Sistema lógico fuzzy na avaliação do conforto ambiental de espaços educacionais. Revista da Faculdade de Tecnologia FAESA. nº 9, p. 69-76, 2016.

RIBEIRO, M.R., SAMPAIO, E.V.S.B., GALINDO, I.C.L. Os solos e o processo de desertificação no semiárido brasileiro. In: RIBEIRO, M.R. et al. eds. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa- MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 413-454, 2009.

RODRIGUES, T.K., BARRETO, S.A., SOUZA, E.S. Expansão urbana e dinâmica marinha da praia da costa no município de barra dos coqueiros – Sergipe. In: PEREZ FILHO, A., AMORIM, R.R. (org). Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento. v. 1, Campinas: Instituto de Geociências, p. 2854-2863. 2017.

ROSA, R. e BRITO, J.L.S. Introdução ao Geoprocessamento: Sistema de Informações Geográficas. Uberlândia, EDUFU. 104p. 1996.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. Revista do Departamento de Geografia, v. 16, p.81-90. 2005.

ROSA, R., BRITO, J.L.S. Introdução ao geoprocessamento: sistema de informação geográficas. Uberlândia: EDUFU, 104p. 1996.

ROSS, J.L.S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. Revista do Departamento de Geografia. São Paulo, DG-FFLCH-USP. n. 8, p. 63-73, 1994.

ROSS, J.L.S. Geomorfologia: Ambiente e Planejamento 8. ed. São Paulo: Contexto, (Repensando a Geografia). 85p. 2005.

ROY, J, SAHA, S. GIS-based Gully Erosion Susceptibility Evaluation Using Frequency Ratio, Cosine Amplitude and Logistic Regression Ensembled with *fuzzy* logic in Hinglo River Basin, India. v. 15. 2019.

ROYA, J., SAHAB, S. GIS-based Gully Erosion Susceptibility Evaluation Using Frequency Ratio, Cosine Amplitude and Logistic Regression Ensembled with *fuzzy* logic in Hinglo River Basin, India. Remote Sensing Applications: Society and Environment v. 15, 2019.

RUBIRA, F.G. Definição e diferenciação dos conceitos de áreas verdes/espços livres e degradação ambiental/impacto ambiental. Caderno de Geografia, v. 26, p. 134-150, 2016.

SALOMÃO, F.X.T. Controle e prevenção dos Processos Erosivos. In GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (orgs) 1999. Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340p. 1999.

SÁNCHEZ, L.E. Avaliação de Impacto Ambiental: conceitos e métodos. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

SANTOS, G.G., GRIEBELER, N.P., OLIVEIRA, L.F.C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 2, p. 115-123, 2010.

SANTOS, L.A.N., NASCIMENTO, P.S.R. Compartimentação da Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba (SE) através da Densidade de drenagem fluvial. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 5, 2018, Juazeiro. Anais... Juazeiro, p. 1336-1341, 2018.

SANTOS, R. F. (org.) Vulnerabilidade Ambiental desastres naturais ou fenômenos induzidos. MMA, Brasília, 2007.

SANTOS, R.A., MARTINS, A.A.M., NEVES, J.P. Geologia e recursos minerais do estado de Sergipe. Brazilian Geological Survey (CPRM), Salvador, Brazil. 2001.

SCREMIN, O.B., MAROLLI, A., MANTAI, R.D., KOLLING, K., REGINATTO, D.C., DA SILVA, J.A.G. Lógica fuzzy na previsibilidade da produtividade de grãos de aveia nas formas de fornecimento do nitrogênio. In: SEMINÁRIO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA, 8, 2018. Anais... p. 1336-1341, 2018.

SEMA, H.V., GURU, B., VEERAPPAN, R. *Fuzzy gamma operator model for preparing landslide susceptibility zonation mapping in parts of Kohima Town, Nagaland, India*. Model. Earth Syst. Environ. 2017.

SERGIPE - Secretaria de Estado da Agricultura e Desenvolvimento Rural. Informações Gerais /Caracterização do Estado. Sergipe. Disponível em: <<https://www.seagri.se.gov.br/informacoes/1/caracterizacao-do-estado>>. Acesso em: abr. 2020.

SERGIPE. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Atlas Digital sobre Recursos Hídricos. Aracaju. SEMARH - 1DVD. 2014

SERGIPE. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Atlas Digital de Recursos Hídricos. Sergipe. 2010.

SERGIPE. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Plano Estadual dos Recursos Hídricos de Sergipe. Relatório Final. v.2. 2011.

SFB – Serviço Florestal Brasileiro. Inventário Florestal Nacional: Sergipe: principais resultados. Ministério do Meio Ambiente, Brasília. 2017.

SHINZATO, E., CARVALHO FILHO, A., TEIXEIRA, W. G. Solos tropicais. In: SILVA, C. R. Geodiversidade do Brasil: conhecer o passado, para entender o presente e prever o futuro. Rio de Janeiro: CPRM, p. 121 – 134. 2008.

SHIRAN, A.A.M, ASADI, M.Z., KERAMATI, F. Landslide susceptibility zonation using the *fuzzy* algebraic operators in GIS, Iran. Journal of Materials and Environmental Science. v. 8, n. 1, p. 50-59, 2017.

SILVA, N.S, ALVES, J.M.B., DA SILVA, E.M., LIMA, R.R. Avaliação da Relação Entre a Climatologia, as Condições Sanitárias (Lixo) e a Ocorrência de Arboviroses (Dengue e Chikungunya) em Quixadá-CE no Período Entre 2016 e 2019. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. 3, p. 485-492, 2020.

SILVA FILHO, M.A., TORRES, H.H.F. A new interpretation on the Sergipano Belt Domain, Academia Brasileira de Ciências, Anais, v. 74, n.3, p.556-557. 2002.

SILVA JUNIOR, C.H L. Lógica *Fuzzy* e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao Zoneamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos: Uma Revisão. Revista Monografias Ambientais - REMOA v. 14, n.3, p.42-58. 2015.

SILVA, A.B. et al. Estudos Geológicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos e Geoambientais Integrados do município de Belo Horizonte. IGC/UFMG. Belo Horizonte, 138 p. 1995.

SILVA, A.M., SILVA, M.L.N., CURI, N., AVANZI, J.C., FERREIRA, M.M. Erosividade da chuva e erodibilidade de cambissolo e latossolo na região de lavras, sul de Minas Gerais. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v. 33, p. 1811-1820, 2009.

SIMPSON, J., KUMMEROW, C., TAO, W., ADLER, R.F. On the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). Meteor. Atmos. Phys., v. 60, p. 19–36. 1996.

SOBRINHO, J.F. Precipitação e erosão do solo na Serra das Matas no ambiente do semiárido cearense. Fórum Ambiental da Alta Paulista, v. 11, n. 6, p. 218-234. 2015.

SOUSA SILVA, L.C. «Fragilidade hídrica e ecodinâmica na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe: Desafios à Gestão das águas». Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia – Doutorado, UFS, São Cristóvão (SE), 2014. 270 f.

SOUZA et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine - Remote Sensing, v. 12, n. 17. 2020.

SOUZA, C.R., CRÓSTA, A.P. Geotecnologias aplicadas à geologia. Revista Brasileira de Geociências. v. 33, p.1-4. 2003.

SOUZA, J.J., NASCIMENTO, R., ARAÚJO, M.N.C., OLIVEIRA, E. P., TEZINI, F.C. Interpretação geológica do Domínio Canindé, Faixa Sergipana (NE do Brasil), a partir de imagem Landsat ETM+. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 937- 942. 2003

SOUZA, M.F.L. de. COUTO, E.C.G. Caracterização Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Piauí (SE). In: Schiavetti, A., Camargo, A. F. M. Conceitos de Bacias Hidrográficas. Ilheus, Bahia: Editus, 2002.

SOUZA, N. P., SILVA, E. M. G. C., TEIXEIRA, M. D., LEITE, L. R., REIS, A. A., SOUZA, L. N., ACERBI JUNIOR, F. W., RESENDE, T. A. Aplicação do estimador de densidade kernel em unidades de conservação na bacia do rio São Francisco para análise de focos de desmatamento e focos de calor. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR). Foz do Iguaçu. Anais... São José dos Campos: INPE, p. 4958-4965, 2013.

SOUZA, Z.M., de PRADO, R. de M., PAIXÃO, A.C.S., CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 40, p. 271-278, 2005.

VALERIANO, M.M., ROSSETTI, D.F., ALBUQUERQUE, P.C.G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura

nacional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, RN. Anais..., São José dos Campos, SP: INPE. CD-ROM. p. 1-8. 2009.

VIEIRA, S.O, OLIVEIRA, N.V., SATYAMURTY, P., ANDREOLI, R.V. Aplicação do método fuzzy na classificação da zona de convergência do atlântico sul no sul da Amazônia. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, n. 4, p. 621 - 631, 2014.

Vieira, L.C. P. F. S. Modelagem fuzzy de dados climáticos estimados por modelo matemático – CCATT-BRAMS. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 72 f., 2015

WEI, W., CHEN, L., FU, B., CHEN, J. Water Erosion Response to Rainfall and Land Use in Different Drought-Level Years in a Loess Hilly Area of China. Catena, v. 81, p.24-31. 2010.

WEST, D. C. Mapeamento Geológico (escala 1:25.000) e modelo tectonossedimentar para a Formação Barreiras no Sul do Estado do Espírito Santo. 2017. 86 f. Trabalho Final de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

WOLFF, D.B., MARKS, D.A., AMITAI, E., SILBERSTEIN, D.S., FISHER, B.L., TOKAY, A., WANG, J., PIPPITT, J.L. Ground Validation for the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). American Meteorological Society. 2005. Disponível em: http://journals.ametsoc.org/jtech/article-pdf/22/4/365/3867242/jtech1700_1.pdf. Acesso em: mai. 2020.

ZADEH, L.A. *Fuzzy sets information and control*. Inf control. v. 8, p. 338–353. 1965.

ZHONGMING, W., LEES, B.G., FENG, J., WANNING, L., HAIJING, S. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. Catena, v. 83, p.87-93. 2010.

ZHONGMING, W., LEES, B. G., FENG, J., WANNING, L., HAIJING, S. Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. Catena, v. 83, p.87-93. 2010.

ZHU, M., TAN, S., DANG, H., ZHANG, Q. Rare Earth Elements Tracing the Soil Erosion Processes on Slope Surface Under Natural Rainfall. Journal of Environmental Radioactivity, v. 102, p. 1078-1084. 2011.