



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL**

Ingredy Nataly Fernandes Araújo

**MAPEAMENTO E ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL
INDUZIDA PELO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM UMA UNIDADE
DE PLANEJAMENTO HIDROLÓGICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

**Natal/RN
2019**

Ingedy Nataly Fernandes Araújo

**MAPEAMENTO E ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL
INDUZIDA PELO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM UMA UNIDADE
DE PLANEJAMENTO HIDROLÓGICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientadora: Profa. Dra. Karina Patrícia Vieira da Cunha

Co-orientadora: Dra. Maria de Fátima Alves de Matos

Natal/RN

2019

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Araújo, Ingredy Nataly Fernandes.

Mapeamento e análise da vulnerabilidade ambiental induzida pelo uso e ocupação do solo em uma unidade de planejamento hidrológico no semiárido brasileiro / Ingredy Nataly Fernandes Araújo. - 2019.

89 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal, RN, 2019.

Orientadora: Profa. Dra. Karina Patrícia Vieira da Cunha.

Coorientadora: Dra. Maria de Fátima Alves de Matos.

1. Degradação ambiental - Dissertação. 2. Geoprocessamento - Dissertação. 3. Zona ripária - Dissertação. 4. Armando Ribeiro Gonçalves (barragem) - Açu (RN) - Dissertação. I. Cunha, Karina Patrícia Vieira da. II. Matos, Maria de Fátima Alves de. III. Título.

RN/UF/BCZM

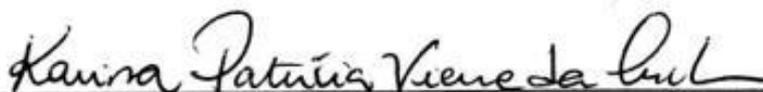
CDU 504(043.3)

INGREDY NATALY FERNANDES ARAÚJO

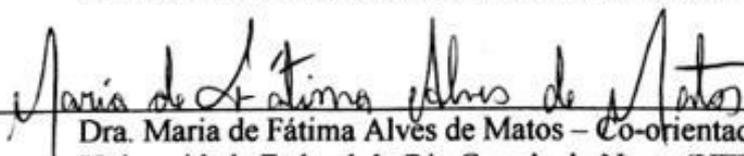
**MAPEAMENTO E ANÁLISE DA VULNERABILIDADE
AMBIENTAL INDUZIDA PELO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM
UMA UNIDADE DE PLANEJAMENTO HIDROLÓGICO NO
SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Sanitária da
Universidade Federal do Rio Grande do Norte,
como requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Sanitária.

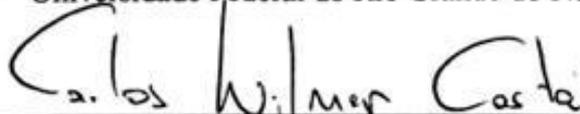
BANCA EXAMINADORA



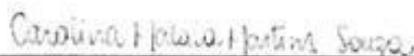
Prof. Dra. Karina Patrícia Vieira da Cunha – Orientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



Dra. Maria de Fátima Alves de Matos – Co-orientadora
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



Prof. Dr. Carlos Wilmer Costa – Examinador interno
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



Prof. Dra. Carolina Malala Martins Souza – Examinador externo
Universidade Federal Rural do Semi-árido (UFERSA)

Natal/RN, 03 de maio de 2019

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos recebidas em minha vida, que proporcionaram a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais, João Batista Araújo e Maria Liege Fernandes de Araújo, por toda a dedicação, amor, apoio e incentivo. A minha irmã, Natália Emília Fernandes Araújo, por todo o amor e companheirismo. Vocês são minha maior motivação.

Aos demais membros da família e amigos que de alguma forma também me ajudaram e torcem por mim.

Ao meu namorado, Luiz de França Junior, por todo o amor, apoio, amizade e compreensão.

A minha orientadora, professora Karina Patrícia Vieira da Cunha, pela dedicação e amor em suas orientações. Por ter me proporcionado valiosos ensinamentos profissionais e pessoais e por ter me possibilitado uma evolução tão grande nessa caminhada acadêmica.

A minha co-orientadora, Maria de Fátima Alves de Matos, pelo carinho, atenção, dedicação e disponibilidade em ajudar.

A equipe LabSolo pelo auxílio na coleta do solo e realização das análises, pela amizade e pelos momentos de descontração vividos. Sem vocês essa caminhada teria sido bem mais árdua. Agradeço especialmente a minha colega de turma Jéssica Freire pela dedicação com as metodologias das análises. Destaco também a companhia e dedicação de Amanda Ribeiro, Ana Paula Marinho, Giulliana Cunha, Rayane Dias, e os demais que também fizeram parte da equipe ou contribuíram em algum momento. Vocês fizeram com que meus dias fossem mais alegres.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária pelos ensinamentos e dedicação e também aos funcionários por estarem sempre dispostos a ajudar. Aos colegas de turma pela companhia e contribuições.

Ao Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (LARHISA) e ao Centro Tecnológico de Engenharia (CTEC) pela espaço e materiais concedidos para a realização deste trabalho. Em especial a técnica de laboratório Radmila Ferreira pela atenção e auxílio com as análises.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos demais que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, muito obrigada.

MAPEAMENTO E ANÁLISE DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL INDUZIDA PELO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO EM UMA UNIDADE DE PLANEJAMENTO HIDROLÓGICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

A degradação ambiental é um problema global intensificado pelo uso e ocupação do solo, sem adoção de critérios técnicos, que além de promover a perda de funções e serviços ecossistêmicos essenciais à sobrevivência humana, aumenta a vulnerabilidade da região. Os efeitos da substituição da vegetação nativa por usos antrópicos, principalmente em zonas ripárias, são mais agravantes em regiões semiáridas tropicais, em decorrência das suas características naturais que a tornam susceptível à degradação. Nessas regiões é menos perceptível a distinção entre a vulnerabilidade condicionada por fatores naturais, daquela ocasionada por fatores antrópicos. Então, o objetivo desta pesquisa foi mapear e avaliar as alterações na vulnerabilidade natural e nos atributos físicos e químicos do solo promovidas pelo uso e ocupação na Unidade de Planejamento Hidrológico, onde encontra-se inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves. A avaliação espacial dos graus de vulnerabilidade foi obtida a partir da análise integrada de aspectos físicos e ambientais, utilizando geoprocessamento. E a degradação do solo foi avaliada por meio da análise comparativa dos atributos físicos e químicos do solo sob diferentes usos, tendo como referência um solo sob vegetação nativa. Os resultados deste trabalho indicam que o uso antrópico promove aumento da vulnerabilidade natural e a degradação do solo. Essa problemática pode ser mais agravada caso haja a intensificação de atividades antrópicas sem a compatibilização dos usos suportados e manejo adequado das atividades. O solo apresentou-se como um dos principais responsáveis pela alta vulnerabilidade natural e ambiental da região, devendo sua qualidade ser mantida para evitar a degradação dos sistemas terrestres e aquáticos. Por isso, essa temática deve ser levada em consideração nas decisões políticas e ambientais, para que regiões ambientalmente vulneráveis sejam efetivamente protegidas.

Palavras-chave: geoprocessamento, degradação ambiental, zona ripária, Armando Ribeiro Gonçalves.

**MAPPING AND ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL VULNERABILITY INDUCED
BY THE LAND USE IN A HYDROLOGICAL PLANNING UNIT IN THE
BRAZILIAN SEMIARID**

ABSTRACT

Environmental degradation is a global problem intensified by land use, without adoption of technical criteria, which besides promoting the loss of ecosystem functions and services essential to human survival, increases the vulnerability of the region. The effects of the substitution of native vegetation for anthropic uses, especially in riparian zones, are more aggravating in Brazilian tropical semiarid regions, due to their natural characteristics that make it susceptible to degradation. In these regions the distinction between vulnerability conditioned by natural factors, that caused by anthropic factors, is less perceptible. So, the objective of this research was to map and evaluate the changes in the natural vulnerability and the physical and chemical attributes of the soil promoted by the land use in the Hydrological Planning Unit, where the Armando Ribeiro Gonçalves reservoir is inserted. The spatial evaluation of degrees of vulnerability was obtained from the integrated analysis of physical and environmental aspects, using geoprocessing. And the soil degradation was evaluated through the comparative analysis of the physical and chemical attributes of the soil under different uses, with reference to a soil under native vegetation. The results of this work indicate that the anthropic use promotes increased natural vulnerability and soil degradation. This problem can be further aggravated if there is an intensification of anthropic activities without the compatibility of supported uses and proper management of activities. The soil presented as one of the main responsible for the high natural and environmental vulnerability of the region, and its quality must be maintained to avoid degradation of terrestrial and aquatic systems. Therefore, this theme must be taken into account in policy and environmental decisions, so that environmentally vulnerable regions are effectively protected.

Keywords: geoprocessing, environmental degradation, riparian zone, Armando Ribeiro Gonçalves..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar e do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, inseridos na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açú, semiárido do Nordeste do Brasil.....	25
Figura 2 – Classes de solos existentes na unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.....	33
Figura 3 – Geologia da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	34
Figura 4 – Intensidade pluviométrica da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.....	35
Figura 5 – Cobertura vegetal da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	36
Figura 6 – Classes de declividade da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.....	37
Figura 7 – Altimetria da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	38
Figura 8 - Uso e ocupação do solo da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.....	39
Figura 9 – Mapas reclassificados utilizados como indicadores para a geração dos mapas de vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	40
Figura 10 – Vulnerabilidade natural da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.....	42
Figura 11 – Vulnerabilidade natural da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado na unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar	43
Figura 12 – Vulnerabilidade ambiental da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.....	44
Figura 13 – Vulnerabilidade ambiental da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado na unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar	45
Figura 14 – Localização do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, pertencente a unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, localizado na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açú, semiárido do Nordeste do Brasil	60

Figura 15 – Classificação supervisionada do uso e ocupação do solo da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	64
Figura 16 – Análise de componentes principais dos atributos físicos e químicos do solo sob diferentes classes de uso e ocupação na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações utilizadas para a avaliação da vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.....	26
Tabela 2 – Valores de vulnerabilidade atribuídos às classes dos mapas utilizados para o cálculo da vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	28
Tabela 3 – Pesos utilizados na álgebra de mapas para o cálculo da vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	30
Tabela 4 – Classificação do grau de vulnerabilidade e padronização das cores utilizadas na elaboração dos mapas de vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	31
Tabela 5 – Área percentual dos graus de vulnerabilidade dos mapas reclassificados utilizados como indicadores para a geração da vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves Sol = Solos; Geo = Geologia; Int = Intensidade pluviométrica; Veg = Vegetação; Dec = Declividade; Alt = Altimetria; Uso = Uso e ocupação do solo.....	41
Tabela 6 – Comparação entre as áreas dos graus de vulnerabilidade natural do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	43
Tabela 7 – Comparação entre as áreas dos graus de vulnerabilidade ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	46
Tabela 8 – Comparação entre as áreas dos graus de vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar	46
Tabela 9 – Comparação entre as áreas de vulnerabilidade natural e ambiental da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	46
Tabela 10 – Coordenadas dos pontos de coleta de amostras de solo na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	62
Tabela 11 – Áreas das classes de uso e ocupação identificadas na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves	65
Tabela 12 – Estatística descritiva (média±desvio padrão, mínimo - máximo) dos atributos físicos do solo sob diferentes classes de uso e ocupação na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves. Classes: PEC = Pecuária; URB = Urbano; GRA = Gramínea; TER =	

Terreno preparado; CAA = Caatinga. Atributos: Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; PT = porosidade total. 66

Tabela 13 – Estatística descritiva (média±desvio padrão; mínimo-máximo) dos atributos químicos do solo sob diferentes classes de uso e ocupação na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves. Classes: PEC = Pecuária; URB = Urbano; GRA = Gramínea; TER = Terreno preparado; CAA = Caatinga. Atributos: CE = Condutividade elétrica; P = Fósforo; CO = Carbono orgânico; MO = Matéria orgânica; N = Nitrogênio; SB = Soma de bases; CTC_{pot} = Capacidade de troca de cátions potencial; V = Saturação por bases; PST = Saturação por sódio. 68

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
REFERÊNCIAS	18
CAPÍTULO 1 – EXPANSÃO DO USO DO SOLO E A VULNERABILIDADE NATURAL DE UMA UNIDADE DE PLANEJAMENTO HIDROLÓGICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	21
RESUMO.....	21
ABSTRACT	22
1 INTRODUÇÃO.....	23
2 MATERIAIS E MÉTODOS	24
2.1 Área de estudo	24
2.2 Geração dos mapas utilizados na avaliação da vulnerabilidade natural e ambiental	26
2.3 Atribuição dos valores de vulnerabilidade	28
2.4 Álgebra de mapas utilizada para a geração dos mapas de vulnerabilidade.....	30
3 RESULTADOS.....	31
4 DISCUSSÃO.....	47
5 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS	52
CAPÍTULO 2 - ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREAS DE USO ANTRÓPICO NA ZONA RIPÁRIA DE UM RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO	56
RESUMO.....	56
ABSTRACT	57
1 INTRODUÇÃO	58
2 MATERIAIS E MÉTODOS	59
2.1 Área de estudo	59
2.2 Classificação supervisionada do uso e ocupação do solo da zona ripária.....	61

2.3	Coleta do solo na zona ripária	62
2.4	Análises físicas e químicas do solo	62
2.5	Análise estatística	63
3	RESULTADOS.....	63
3.1	Uso e ocupação do solo da zona ripária	63
3.2	Atributos físicos e químicos do solo da zona ripária.....	65
4	DISCUSSÃO.....	71
5	CONCLUSÃO	77
	REFERÊNCIAS	78
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
	APÊNDICES	85

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, sob a orientação da Prof.^a Dr.^a Dra. Karina Patrícia Vieira da Cunha e co-orientação da Prof.^a Dr.^a Maria de Fátima Alves de Matos.

O mapeamento e a análise da vulnerabilidade ambiental induzida pelo uso e ocupação do solo em uma unidade de planejamento hidrológico no semiárido brasileiro é o tema deste trabalho. A dissertação é composta por dois capítulos em formato de artigo científico, cada qual contendo resumo, abstract, introdução, materiais e métodos, resultados, discussão, conclusões e referências bibliográficas. Previamente a apresentação dos capítulos, tem-se uma introdução geral com o objetivo de contextualizar o tema e apresentar a problemática. O capítulo 1 refere-se à expansão do uso do solo e a vulnerabilidade natural de uma unidade de planejamento hidrológico no semiárido brasileiro. O capítulo 2 aborda os atributos do solo em áreas de uso antrópico na zona ripária de um reservatório no semiárido brasileiro. No final do trabalho tem-se as considerações finais, com o intuito de relacionar os dois capítulos e destacar as principais conclusões obtidas.

INTRODUÇÃO GERAL

A exploração dos recursos naturais sem manejo adequado está promovendo degradação ambiental, causando problemas de importância global. A degradação do solo, por exemplo, resulta na perda de funções e serviços ecossistêmicos essenciais à sobrevivência humana, incluindo serviços agrícolas, não-ecológicos e ambientais, tais como: produção de alimentos, sustento de edificações, manutenção da qualidade da água, regulação de enchentes, reserva de carbono e nutrientes, entre outros (FOLEY *et al.*, 2005; KARLEN; RICE, 2015; BÜNEMANN *et al.*, 2018).

O uso e ocupação do solo, em geral, aumenta a vulnerabilidade de uma região, acelerando e intensificando a degradação ambiental. A vulnerabilidade ambiental está relacionada à susceptibilidade de uma área em sofrer danos, quando submetida a uma determinada ação antrópica e é uma função dos potenciais impactos, do grau de sensibilidade do meio à mudança e da sua capacidade de adaptação (METZGER *et al.*, 2006; FIGUEIRÊDO *et al.*, 2007; CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV, 2018).

Um dos principais indicadores da vulnerabilidade ambiental é a susceptibilidade do solo à ocorrência de erosão (HENTATI *et al.*, 2010; CUIABANO *et al.*, 2017). Apesar de ser um processo natural atuante na formação da superfície terrestre, por vezes, as atividades antrópicas deflagram e intensificam as etapas erosivas naturais (FUSHIMI *et al.*, 2013; MAKAYA *et al.*, 2019), tornando a erosão uma das ameaças mais significativas para a degradação do solo no mundo (KARLEN; RICE, 2015). A erosão contribui para a redução da capacidade produtiva dos solos, devido ao comprometimento da qualidade física, química e biológica dos solos, além de afetar a qualidade dos recursos hídricos pelo aporte de sedimentos e nutrientes (MERTEN; MINELLA, 2003; ZHANG *et al.*, 2017), contribuindo para o aumento dos processos de assoreamento e eutrofização, respectivamente (NGUYEN *et al.*, 2017). Dessa forma, o solo pode atuar como fonte difusa de contaminação para os mananciais superficiais (MOURI; TAKIZAWA; OKI, 2011; NGUYEN *et al.*, 2017).

Os efeitos da falta de planejamento do uso e ocupação do solo acabam atingindo as zonas ripárias. As zonas ripárias são regiões de interface entre os sistemas aquáticos e terrestres, que abrigam a vegetação ciliar, e desempenham importantes funções ambientais: estabilização do solo nas margens, fornecimento de matéria orgânica, aumento do potencial de drenagem do solo, purificação e armazenamento da água, entre outros (GUO *et al.*, 2013; HALE *et al.*, 2014; GONZÁLEZ *et al.*, 2017). Efeitos adversos sobre esse ambiente promovem consequências

negativas também a qualidade de vida humana e o desenvolvimento econômico (METZGER *et al.*, 2006; GONZÁLEZ *et al.*, 2017).

Existe um consenso geral de que a substituição da vegetação nativa por usos antrópicos promove a perda de qualidade ambiental, pois degrada o solo, diminui a resiliência da área, aumentando a susceptibilidade à erosão do solo e o potencial de contaminação por fontes difusas (GUO *et al.*, 2013; HALE *et al.*, 2014; GONZÁLEZ *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018). Esse resultado é ainda mais significativo quando se trata da substituição da vegetação ciliar, presente em zonas ripárias, por atividades antrópicas. No Brasil, as zonas ripárias são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP), instituídas por Lei (BRASIL, 2012). Apesar disso, essas regiões são ocupadas por atividades com alto potencial de degradação ambiental, como agropecuária e urbanização (OLIVEIRA, 2012; GUO *et al.*, 2013; FERREIRA, 2015; MEDEIROS, 2016). Esses usos são capazes de promover a modificação do pH do solo, o aumento da compactação e da densidade do solo, a diminuição da porosidade e da taxa de infiltração, diminuindo a estabilidade de agregados, resultando no aumento da erodibilidade do solo e aporte de sedimentos, contaminantes e nutrientes em outros sistemas ambientais (ISLAM; WEIL, 2000; GEISSEN *et al.*, 2009; BARROS; CHAVES, 2014; NABIOLLAHI *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018).

A vulnerabilidade à degradação ambiental das zonas ripárias em virtude da ocupação antrópica é mais agravante em regiões semiáridas tropicais. Essas áreas são classificadas como naturalmente vulneráveis, mesmo em condições de paisagem natural, devido a características como: (1) clima quente e seco, que propicia a predominância do intemperismo físico, gerando solos pouco desenvolvidos e em geral de textura arenosa; (2) escassez hídrica com chuvas irregulares e concentradas em um curto período de tempo; e (3) vegetação nativa (caatinga) escassa e rala, que promove uma baixa cobertura do solo (BARBOSA *et al.*, 2012; PEREIRA; DANTAS NETO, 2014). Tais características classificam o semiárido brasileiro como susceptível à desertificação (MMA, 2007). Essa característica intrínseca da região semiárida torna menos perceptível a distinção entre a vulnerabilidade condicionada por fatores naturais, daquela ocasionada por fatores antrópicos.

Por ser uma região marcada pela escassez hídrica, o problema mais emergente se torna o atendimento às demandas hídricas, estando a maior parte dos estudos voltados para os aspectos quantitativos e qualitativos da água. Entretanto, o solo é um sistema aberto, dinâmico em constante interação com os demais componentes do ecossistema. Logo, as alterações promovidas na qualidade do solo, refletirão também sobre a qualidade da água. De fato, estudos revelam a perda da qualidade da água em reservatórios tropicais cuja zona ripária é explorada

para os mais diversos usos antrópicos (OLIVEIRA, 2012; OLIVEIRA, 2013; MIRANDA, 2014; FERREIRA, 2015; MEDEIROS, 2016). Além disso, foi constatado que o uso e ocupação do solo promove o aumento da vulnerabilidade ambiental de uma região (CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV, 2018).

Dessa forma, o desenvolvimento sustentável deve levar em consideração a resiliência do ambiente, avaliando as características naturais da região e a sua vulnerabilidade. Para isso, a utilização do geoprocessamento, por meio da análise integrada de aspectos físicos e ambientais, tais como: geomorfologia, geologia, pedologia, vegetação e clima, permitem a análise espacial dos graus de vulnerabilidade de uma região (CABRAL *et al.*, 2011; CREPANI *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2018), gerando resultados eficientes, precisos e de baixo custo (MAKAYA *et al.*, 2019) que auxiliam na identificação de áreas com limitação do uso do solo.

Com relação à perda de qualidade do solo, essa pode ser avaliada por meio da análise comparativa dos atributos físicos e químicos do solo sob diferentes usos, tendo como referência um solo sob vegetação nativa. A qualidade do solo está relacionada à sua capacidade de funcionar como um ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e sustentar a sobrevivência humana (KARLEN *et al.*, 1997; BÜNEMANN *et al.*, 2018).

Conhecer a vulnerabilidade natural e ambiental de uma região e estudar a resposta dos atributos físicos e químicos do solo ao uso e ocupação, pode servir como um “sistema de alerta precoce” (AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017), que auxilia cientistas e o poder público nas tomadas de decisões sobre o uso e manejo adequado do solo e na seleção de áreas prioritárias de conservação da geodiversidade e recuperação do solo, contribuindo para a manutenção da qualidade ambiental e implementação de políticas ambientais (CUIABANO *et al.*, 2017; BÜNEMANN *et al.*, 2018; MEHRA; SINGH, 2018).

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi mapear e avaliar as alterações na vulnerabilidade natural e nos atributos físicos e químicos do solo promovidas pelo uso e ocupação na Unidade de Planejamento Hidrológico, onde encontra-se inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado no semiárido tropical brasileiro.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, A. R. de; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. de (Org.). **Vulnerabilidade ambiental**. São Paulo: Blucher, 2017. 112.
- BARBOSA, J. E. de L. *et al.* Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 103–118, 2012.
- BARROS, J. D. S.; CHAVES, L. H. G. Changes in soil chemical properties under different farming systems exploration in semiarid region of Paraíba. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 31, p. 2436–2442, 2014.
- BRASIL. **Lei nº 12651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2012.
- BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. September 2017, p. 105–125, 2018.
- CABRAL, J. B. P. *et al.* Mapeamento da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Doce (GO), utilizando técnicas de geoprocessamento. **GeoFocus**, n. 11, p. 51–69, 2011.
- CHOUDHARY, K.; SINGH, M.; KUPRIYANOV, A. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan , Russia. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 21, n. 2, p. 139–147, 2018.
- CREPANI, E. *et al.* **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.
- CUIABANO, M. do N. *et al.* Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica na sub-bacia do córrego do guanabara/ reserva do cabaçal-MT Brasil. **Geociencias**, v. 36, n. 1, p. 138–153, 2017.
- FERREIRA, R. S. **Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.
- FIGUEIRÊDO, M. C. B. de *et al.* Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 399–409, 2007.
- FOLEY, J. A. *et al.* Global Consequences of Land Use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005.

FUSHIMI, M. *et al.* Vulnerabilidade ambiental e aplicação de técnicas de contenção aos processos erosivos lineares em áreas rurais do município de Presidente Prudente-SP. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 4, p. 343–356, 2013.

GEISSEN, V. *et al.* Geoderma Effects of land-use change on some properties of tropical soils — An example from Southeast Mexico. **Geoderma**, v. 151, p. 87–97, 2009.

GONZÁLEZ, E. *et al.* Integrative conservation of riparian zones. **Biological Conservation**, v. 211, p. 20–29, 2017.

GUO, E. *et al.* Effects of riparian vegetation patterns on the distribution and potential loss of soil nutrients: a case study of the Wenyu River in Beijing. **Front Environ Sci Eng**, 2013.

HALE, R. *et al.* Scales that matter: guiding effective monitoring of soil properties in restored riparian zones. **Geoderma**, v. 228–229, p. 173–181, 2014.

HENTATI, A. *et al.* Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map. **Geomorphology**, v. 122, n. 1–2, p. 56–64, 2010.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 79, n. 1, p. 9–16, 2000.

KARLEN, D. L. *et al.* Soil Quality: A Concept, Definition, and Framework for Evaluation. **Soil Science Society of America**, v. 61, p. 4–10, 1997.

KARLEN, D. L.; RICE, C. W. Soil degradation: Will humankind ever learn? **Sustainability**, v. 7, n. 9, p. 12490–12501, 2015.

MAKAYA, N. *et al.* Geospatial assessment of soil erosion vulnerability in the upper uMgeni catchment in KwaZulu Natal, South Africa. **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, n. March, p. 0–1, 2019.

MEDEIROS, C. E. B. F. DE S. **Os impactos do uso e ocupação e evento de seca extrema na qualidade da água e do solo de um manancial tropical semiárido.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.

MEHRA, M.; SINGH, C. K. Spatial analysis of soil resources in the Mewat district in the semiarid regions of Haryana, India. **Environment, Development and Sustainability**, v. 20, n. 2, p. 661–680, 2018.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G. **Projeto de monitoramento ambiental de microbacias hidrográficas - RS - Rural, subprojeto 7.** Porto Alegre, IPH-UFRGS, 2003.

METZGER, M. J. *et al.* The vulnerability of ecosystem services to land use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 114, n. 1, p. 69–85, 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Atlas de áreas susceptíveis a**

desertificação no Brasil. Santana, M.O. (Org.). Brasília: MMA, 2007. 134 p.

MIRANDA, K. R. **Influência do uso e ocupação de solo na qualidade da água de um reservatório mesotrófico na região semiárida tropical.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

MOURI, G.; TAKIZAWA, S.; OKI, T. Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 7, p. 1837–1848, 2011.

NABIOLLAHI, K. *et al.* Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. **Ecological Indicators**, v. 83, n. July, p. 482–494, 2017.

NGUYEN, H. H. *et al.* Modelling the impacts of altered management practices, land use and climate changes on the water quality of the Millbrook catchment-reservoir system in South Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 1–11, 2017.

OLIVEIRA, H. A. de. **Análise do uso e ocupação do solo das margens de um reservatório e a sua influência na qualidade da água.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.

OLIVEIRA, J. N. P. de. **A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.

PEREIRA, R. A.; DANTAS NETO, J. Efeito das atividades agropastoris sobre os atributos físico-químicos de três classes de solos de uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro. **Bol. Goia. Geogr.**, v. 34, n. 1, p. 169–188, 2014.

WANG, P. *et al.* Effects of Urbanization, Soil Property and Vegetation Configuration on Soil Infiltration of Urban Forest in Changchun, Northeast China. **Chinese Geographical Science**, v. 28, n. 3, p. 482–494, 2018.

ZHANG, S. *et al.* The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed. **Science of the Total Environment**, v. 574, p. 34–45, 2017.

ZHAO, J. *et al.* Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method. **Ecological Indicators**, v. 91, p. 410–422, 2018.

CAPÍTULO 1 – EXPANSÃO DO USO DO SOLO E A VULNERABILIDADE NATURAL DE UMA UNIDADE DE PLANEJAMENTO HIDROLÓGICO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

A degradação ambiental provocada por atividades antrópicas pode ser minimizada caso seja considerada a vulnerabilidade natural dos ambientes, em função das suas características físicas e ambientais. O semiárido tropical apresenta características naturais que o tornam susceptível à degradação ambiental. Contudo, atividades antrópicas podem agravar essa problemática. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi mapear e avaliar a alteração promovida pelo uso e ocupação do solo na vulnerabilidade natural da Unidade de Planejamento Hidrológico Médio Piranhas Potiguar, na qual está inserido o Reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado no Nordeste do Brasil. Para isso, foi realizada a análise integrada de aspectos relacionados à pedologia, geologia, clima, vegetação, geomorfologia e uso e ocupação do solo, por meio de geoprocessamento, a fim de se obter os mapas síntese de vulnerabilidade natural e ambiental da área de estudo. Os resultados indicam que existe uma alta vulnerabilidade natural, influenciada principalmente pelas classes de solo e cobertura vegetal. Além disso, a ocupação antrópica faz com que áreas de menor vulnerabilidade passem a ter maior vulnerabilidade. O adensamento dos usos antrópicos na zona ripária propicia uma maior susceptibilidade à degradação ambiental dessa área. Isso alerta para questão de que a intensificação do uso do solo na região pode agravar ainda mais o cenário de degradação existente, devendo essa temática ser inserida no planejamento ambiental e no gerenciamento dos recursos naturais, principalmente de regiões ambientalmente frágeis e socioeconomicamente importantes como esta.

Palavras-chave: vulnerabilidade ambiental, geoprocessamento, degradação ambiental, Armando Ribeiro Gonçalves.

CHAPTER 1 – EXPANSION OF SOIL USE INCREASES NATURAL VULNERABILITY OF A HYDROLOGICAL PLANNING UNIT IN THE TROPICAL SEMI-ARID

ABSTRACT

Environmental degradation caused by anthropic activities can be minimized if the natural vulnerability of the environments is considered, depending on their physical and environmental characteristics. The tropical semi-arid has natural characteristics that make it susceptible to environmental degradation. However, anthropic activities may exacerbate this problem. In this context, the objective of this research was to map and evaluate the alteration promoted by the land use in the natural vulnerability of the *Médio Piranhas Potiguar* Hydrological Planning Unit, in which the Armando Ribeiro Gonçalves Reservoir is inserted, located in the Northeast of Brazil. For this, the integrated analysis of aspects related to pedology, geology, climate, vegetation, geomorphology and land use was carried out by means of geoprocessing, in order to obtain the synthesis maps of natural and environmental vulnerability of the study area. The results indicate that there is a high natural vulnerability, influenced mainly by the classes of soil and vegetation cover. In addition, anthropogenic occupation makes areas of lower vulnerability become more vulnerable. The densification of the anthropic uses in the riparian zone propitiates a greater susceptibility to the environmental degradation of this area. This is a warning that the intensification of land use in the region may further aggravate the existing degradation scenario, and that this theme should be included in environmental planning and management of natural resources, especially in environmentally fragile and socioeconomically important regions such as this.

Keywords: environmental vulnerability, geoprocessing, environmental degradation.

1 INTRODUÇÃO

O uso e ocupação desordenado do solo e a exploração dos recursos naturais têm causado degradação nos mais diversos ambientes. Na busca pelo desenvolvimento sustentável é necessário que se considere a vulnerabilidade dos ambientes naturais frente às interações das atividades antrópicas sobre o meio ambiente (ROSS, 1994; CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV, 2018).

A vulnerabilidade natural é intrínseca às características naturais da região, podendo ser medida a partir de informações sobre as características físicas e ambientais locais, tais como: geomorfologia, geologia, pedologia, vegetação e clima (ROSS, 1994; CREPANI *et al.*, 2001).

A vulnerabilidade ambiental, por sua vez, está relacionada à susceptibilidade de uma área em sofrer danos, quando submetida a uma determinada ação antrópica (FIGUEIRÊDO *et al.*, 2007). A vulnerabilidade ambiental depende da natureza dos fatores que pressionam ou promovem mudanças ambientais, do grau de sensibilidade do meio à mudança e da sua capacidade adaptativa (METZGER *et al.*, 2006; CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV, 2018).

A susceptibilidade do solo à erosão hídrica é um dos principais indicadores da vulnerabilidade ambiental de uma região (HENTATI *et al.*, 2010; CUIABANO *et al.*, 2017). A erosão é um processo natural atuante na formação da superfície terrestre. No entanto, atividades antrópicas desencadeiam e intensificam as etapas erosivas naturais, acarretando desequilíbrios e degradação da paisagem (FUSHIMI *et al.*, 2013).

O semiárido brasileiro apresenta características naturais que o tornam susceptível à erosão: vegetação nativa esparsa, solos pouco desenvolvidos e escassez hídrica com chuvas concentradas em um curto período de tempo (MMA, 2007; PEREIRA; DANTAS NETO, 2014). O atendimento às demandas hídricas é a questão mais discutida na região, tanto cientificamente, como politicamente, devido a necessidade de abastecimento humano e atendimento aos usos múltiplos indispensáveis ao desenvolvimento de algumas atividades econômicas. Contudo, é importante ressaltar que os componentes de uma bacia hidrográfica interagem entre si e estão interligados, de forma que alterações na qualidade do solo, refletirão também na qualidade e quantidade da água (MIRHOSSEINI *et al.*, 2018). Por isso, é essencial o planejamento do uso do solo a fim de se controlar os processos de degradação. Visto que, estudos realizados em regiões semiáridas identificaram a predominância da vulnerabilidade à erosão média ou alta (FIGUEIRÊDO *et al.*, 2007; MOTA; VALLADARES, 2011). Além disso, foi verificado que existe uma vulnerabilidade natural muito menor que a vulnerabilidade

ambiental, agravada pela expansão do uso do solo (CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV, 2018).

A vulnerabilidade dos ambientes em função de suas características naturais e do uso e ocupação do solo pode ser avaliada a partir da análise integrada de aspectos físicos e ambientais, por meio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) (CABRAL *et al.*, 2011; CREPANI *et al.*, 2011; ZHAO *et al.*, 2018). Informações obtidas por sensoriamento remoto possibilitam analisar regiões grandes, heterogêneas ou mal acessíveis, gerando resultados de forma rápida e eficaz (SCHARSICH *et al.*, 2017).

O geoprocessamento possibilita a geração de um produto síntese dessa análise integrada, por meio da geração de mapas temáticos, permitindo a visualização espacial dos graus de vulnerabilidade, facilitando a interpretação de gestores e da população em geral, para uma melhor gestão dos recursos naturais e implementação de políticas ambientais (AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017).

Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi mapear e avaliar a alteração promovida pelo uso e ocupação do solo na vulnerabilidade natural da Unidade de Planejamento Hidrológico Médio Piranhas Potiguar, na qual está inserido o Reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado no Nordeste do Brasil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

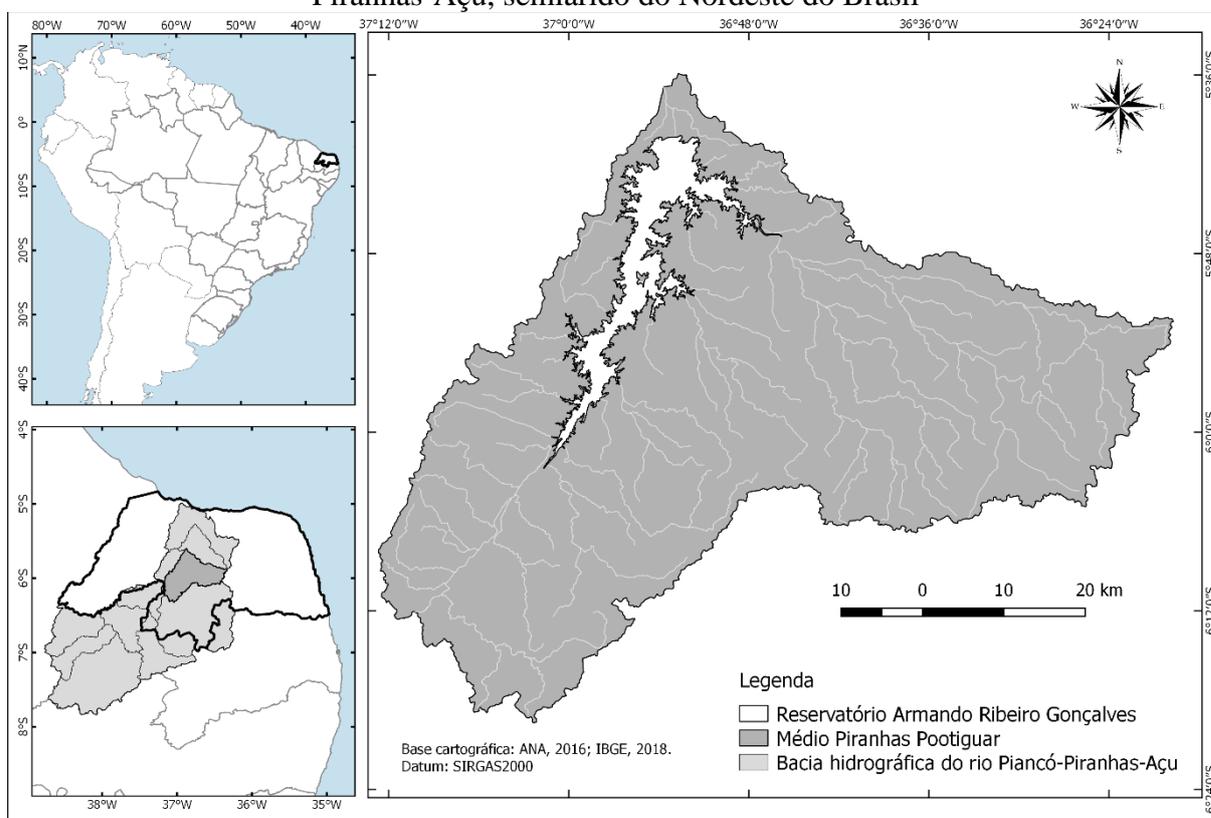
2.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho compreende a Unidade de Planejamento Hidrológico Médio Piranhas Potiguar, pertencente à bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu, localizada no semiárido do Nordeste do Brasil (Figura 1). O Médio Piranhas Potiguar apresenta como rio principal o rio Piranhas, onde está localizado o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, cuja zona ripária, faixa de 100 metros no entorno do manancial (BRASIL, 2012a), também é alvo desse estudo (Figura 1).

A bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu apresenta uma área total de 43.683 km², abrangendo parte dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte (ANA, 2016). O Plano de Recursos Hídricos dessa bacia adotou sua subdivisão em 11 unidades de planejamento hidrológico – UPHs, a partir da homogeneidade de fatores geomorfológicos, hidrográficos e hidrológicos, tendo como critérios a hidrografia, a presença de reservatórios de grande porte e de unidades de gestão adotadas pelos Estados (ANA, 2016).

O Médio Piranhas Potiguar abrange uma área de 3536 km², o que corresponde a 8,1%

Figura 1 – Localização da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar e do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, inseridos na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açú, semiárido do Nordeste do Brasil



da área total da bacia, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, maior reserva hídrica superficial do Rio Grande do Norte (ANA, 2016).

O tipo climático da região é o BSh (ALVARES *et al.*, 2014), caracterizado por ser quente e seco, típico do semiárido. A precipitação média anual varia de 550 mm a 780 mm (ANA, 2016). A irregularidade das precipitações, aliadas às altas taxas de evaporação, culminam em recorrentes períodos de escassez hídrica. O bioma local é a caatinga, com predominância de espécies da savana-estépica arborizada e também ocorrência de áreas antropizadas (IBGE, 2004; MMA, 2007).

A geomorfologia da região é formada predominantemente pela Depressão Sertaneja, caracterizada pela topografia plana a levemente ondulada, ocorrendo também o Planalto da Borborema, que apresenta maior elevação e desnivelamentos topográficos em seus limites (ANGELIM *et al.*, 2006; DINIZ; OLIVEIRA, 2015). As principais classes de solos existentes na região são Neossolos Litólicos, Luvisolos Crômicos e Planossolos Nátricos (EMBRAPA, 1971; SANTOS *et al.*, 2011; EMBRAPA, 2013).

2.2 Geração dos mapas utilizados na avaliação da vulnerabilidade natural e ambiental

O procedimento metodológico para a geração dos mapas de vulnerabilidade natural e ambiental deste trabalho constituiu-se de uma adaptação da metodologia proposta por Crepani (2001), desenvolvida com base no conceito de ecodinâmica (TRICART, 1977).

Para o estudo da vulnerabilidade natural foram considerados aspectos referentes às unidades de paisagem natural (CREPANI *et al.*, 2001) que correspondem a informações sobre o meio físico (Tabela 1). Em razão da grande extensão da área e da indisponibilidade de dados em escalas maiores, foram utilizadas informações de levantamentos nacionais. Para a obtenção da vulnerabilidade ambiental, foi acrescido a análise do uso e ocupação do solo. Estes indicadores foram analisados em ambiente SIG no *software* Qgis, e para cada indicador foi elaborado um mapa para a área de estudo.

Tabela 1 – Informações utilizadas para a avaliação da vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Aspecto	Indicador	Base cartográfica
Pedologia	Tipos de solo	EMBRAPA, 2011
Geologia	Unidades geológicas	CPRM, 2007
Clima	Intensidade pluviométrica	ANA, 2016
Vegetação	Cobertura vegetal	IBGE, 2004
Geomorfologia	Declividade	INPE/TOPODATA
	Altimetria	INPE/TOPODATA
Uso e ocupação do solo*	Classes de uso e ocupação do solo	USGS, 2018

* Utilizado apenas na análise da vulnerabilidade ambiental

A delimitação do Médio Piranhas Potiguar foi obtida no banco de dados do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açu (ANA, 2016). Enquanto para a delimitação da zona ripária foi utilizado um *buffer* de 100 metros a partir da área ocupada pelo corpo hídrico em período de cheia, cujo arquivo vetorial também está disponível nesse banco de dados.

O mapa temático dos tipos de solos foi obtido a partir do arquivo vetorial da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2011), para o qual foi feito o recorte da área de estudo e avaliada a susceptibilidade à erosão dos tipos de solos existentes na região.

Com relação ao aspecto geologia, o arquivo vetorial foi obtido no portal GeoSGB do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2007) e feito o recorte da área de estudo. Foram identificadas as unidades litoestratigráficas existentes e com base nos litotipos correspondentes,

foram atribuídos valores de vulnerabilidade de acordo com a escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns, proposta por Crepani (2001).

A obtenção da distribuição espacial da intensidade pluviométrica da região foi obtida a partir da interpolação dos valores da média histórica de precipitação anual das estações pluviométricas existentes na bacia, cujos dados estão disponíveis no banco de dados do Plano de Recursos Hídricos da Bacia. Considerou-se um período chuvoso de três meses na região, conforme proposto por Crepani (2001), para o cálculo da intensidade pluviométrica em mm/mês. Esse indicador está relacionado à susceptibilidade de ocorrência de processos erosivos.

O mapa de vegetação foi obtido no banco de *downloads* do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2004). Foram realizados o recorte da área de estudo e a identificação dos tipos das unidades de vegetação existentes. A análise do grau de vulnerabilidade considerou a densidade de cobertura do solo promovida pelo tipo de vegetação.

Para a obtenção do mapa de declividade foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), disponibilizado no banco de dados do Plano de Recursos Hídricos dessa bacia. A declividade foi obtida a partir do processamento do *raster* pelo algoritmo *Slope* do GDAL. Os intervalos de declividade foram definidos com base na metodologia proposta pela EMBRAPA (1979), que classifica a declividade em porcentagem, relacionando-a ao tipo de relevo.

O mapa de altimetria foi obtido a partir do MDE do projeto TOPODATA do INPE, disponibilizado no banco de dados do Plano de Recursos Hídricos. Foi feita a reclassificação da imagem para agrupar a elevação em classes que variaram a cada 100 metros. A altitude associada à declividade possibilita a avaliação do potencial erosivo que influencia na vulnerabilidade.

Para mensurar a influência das atividades antrópicas sobre a vulnerabilidade natural, foi utilizado o uso e ocupação do solo na avaliação da vulnerabilidade ambiental. O mapa de uso e ocupação do solo foi obtido a partir da classificação supervisionada de imagens do satélite *Landsat 8*, sensor OLI-TIRS, com resolução espacial multiespectral de 30 m, disponibilizadas no site *Earth Explorer* do *United States Geological Survey* (USGS), capturadas em 17/07/2018. O processo de classificação foi realizado *software* QGis, utilizando-se o complemento *Semi-Automatic Classification Plugin*. O *Google Earth* foi utilizado na identificação das classes de uso e ocupação do solo para seleção das amostras. Foi realizada a padronização das cores do mapa de acordo com os critérios do Manual Técnico do Uso da Terra (IBGE, 2013).

Os mapas foram padronizados para o *Datum* SIRGAS2000 e Sistema de Coordenadas *Universal Transversal de Mercator* (UTM) Zona 24 Sul. Além disso, foram calculadas as respectivas áreas das classes obtidas a partir dos indicadores selecionados como mapas bases para elaboração dos mapas de vulnerabilidade.

2.3 Atribuição dos valores de vulnerabilidade

As informações obtidas a partir desses indicadores receberam uma pontuação de vulnerabilidade (Tabela 2) de forma que as unidades mais estáveis, ou menos vulneráveis, apresentam valores próximos a 1,0, as intermediárias em torno de 2,0 e as unidades de paisagem mais vulneráveis recebem valores próximos a 3,0 (CREPANI *et al.*, 2001).

Tabela 2 – Valores de vulnerabilidade atribuídos às classes dos mapas utilizados para o cálculo da vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Mapas	Classes	Vulnerabilidade (1 - 3)
Declividade	0 – 2 %	1,0
	2 – 6 %	1,5
	6 – 20 %	2,0
	20 – 50 %	2,5
	> 50%	3,0
Geologia	Litofáceis Jucurutú, Metacherte	1
	Diques de Rochas Graníticas	1,1
	Suíte Intrusiva Dona Inêz	1,1
	Suíte Poço da Cruz	1,1
	Suíte Intrusiva Itaporanga	1,2
	Pluton Serra do João Vale	1,2
	Unidade Caicó, Ortognaisse	1,3
	Complexo Caicó	1,3
	Basalto Serra do Cuó	1,5
	Suíte Intrusiva São João do Sabugi	1,5
	Formação Jucurutú	1,5
	Formação Serra dos Quintos	1,5
	Litofáceis Jucurutú, Quartzitos	1,7
	Litofáceis Serra dos Quintos, Formação Ferrífera	1,7
	Formação Seridó	1,7
Unidade Caicó, Metavulcanossedimentar	1,7	
Complexo Caicó, Anfibolito	1,8	
Litofáceis Jucurutú, Mármore	2,3	

	Formação Serra dos Martins	2,5
	Grupo Barreiras	2,6
	Depósitos colúvio-eluviais	3
	Depósitos aluvionares	3
Altimetria	< 20 m	1,0
	20 – 29,5 m	1,1
	29,5 – 39 m	1,2
	39 – 48,5 m	1,3
	48,5 – 58 m	1,4
	58 – 67,5 m	1,5
	67,5 – 77 m	1,6
	77 – 84,5 m	1,7
	84,5 – 94 m	1,8
	94 – 103,5 m	1,9
	103,5 – 113 m	2,0
	113 – 122,5 m	2,1
	122,5 – 132 m	2,2
	132 – 141,5 m	2,3
	141,5 – 151 m	2,4
151 – 160,5 m	2,5	
160,5 – 170 m	2,6	
170- 179,5 m	2,7	
179,5 – 189 m	2,8	
189 – 200 m	2,9	
> 200 m	3,0	
Solos	Planossolos Nátricos Órticos	2
	Luvisolos Crômicos Órticos	2
	Neossolos Litólicos Eutróficos	3
	Neossolos Flúvicos Ta Eutróficos	3
Intensidade Pluviométrica	175 – 200 mm/mês	1,6
	200 – 225 mm/mês	1,7
	225 – 250 mm/mês	1,8
	250 – 275 mm/mês	1,9
Vegetação	Savana-Estépica Arborizada	2,1
	Savana-Estépica Parque	2,5
	Agricultura com Culturas Permanentes	2,9
	Agropecuária	3,0
	Influência Urbana	3,0
Uso e Ocupação do solo	Água	0
	Caatinga	2,3
	Gramínea	2,8

	Agricultura	2,9
	Solo exposto	3
	Urbano	3

Fonte: adaptado de Crepani, 2001.

Para a área do espelho d'água do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves foi atribuído o valor nulo.

Com todos os mapas em formato *raster*, foi feita a reclassificação dos arquivos utilizando-se a ferramenta *r.recode*.

2.4 Álgebra de mapas utilizada para a geração dos mapas de vulnerabilidade

Considerando-se que os indicadores utilizados apresentam diferentes graus de importância no cálculo da vulnerabilidade, optou-se por estabelecer pesos de compensação que indicam a importância de um indicador em relação aos demais (TAGLIANI, 2003). Cada aspecto foi analisado e seus indicadores hierarquizados de acordo com o conhecimento técnico sobre a situação da área em estudo e demais estudos realizados sobre o tema. Foram estabelecidos pesos que totalizam o valor “1,0” (Tabela 3).

Tabela 3 – Pesos utilizados na álgebra de mapas para o cálculo da vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Mapas base	Vulnerabilidade natural	Vulnerabilidade ambiental
Uso e ocupação do solo	-	0,21
Declividade	0,23	0,18
Solos	0,20	0,16
Vegetação	0,20	0,16
Altimetria	0,14	0,12
Geologia	0,12	0,10
Intensidade pluviométrica	0,11	0,07

Assim, esses mapas foram cruzados, por meio da álgebra de mapas, que consiste na sobreposição de vários mapas utilizando uma escala comum e pesos para cada classe conforme sua importância (TERRA *et al.*, 2016), obtendo-se os mapas síntese de vulnerabilidade natural e de vulnerabilidade ambiental.

Na calculadora *raster* foram utilizadas as seguintes equações:

$$VN = \text{“Dec”} * 0,23 + \text{“Sol”} * 0,20 + \text{“Veg”} * 0,20 + \text{“Alt”} * 0,14 + \text{“Geo”} * 0,12 + \text{“Int”} * 0,11$$

$$VA = \text{“Uso”} * 0,21 + \text{“Dec”} * 0,18 + \text{“Sol”} * 0,16 + \text{“Veg”} * 0,16 + \text{“Alt”} * 0,12 + \text{“Geo”} * 0,10 + \text{“Int”} * 0,07$$

Onde:

VN = Vulnerabilidade natural; VA = Vulnerabilidade ambiental

Uso = Uso e ocupação do solo; Dec = Declividade; Sol = Solos; Veg = Vegetação; Alt = Altimetria; Geo = Geologia; Int = Intensidade pluviométrica

Obtidos os mapas, foram feitas as reclassificações para intervalos de vulnerabilidade e a padronização das cores (Tabela 4) e calculadas as respectivas áreas.

Tabela 4 – Classificação do grau de vulnerabilidade e padronização das cores utilizadas na elaboração dos mapas de vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Escala de vulnerabilidade	Classificação da vulnerabilidade
1,0 - 1,4	Muito baixa
1,4 - 1,8	Baixa
1,8 - 2,2	Média
2,2 - 2,6	Alta
2,6 - 3,0	Muito alta

Fonte: adaptado de Crepani, 2001

Todos esses procedimentos foram realizados para a área de estudo do Médio Piranhas Potiguar, em seguida foi feito o recorte para a zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves.

3 RESULTADOS

Os mapas bases, utilizados como indicadores para a geração dos mapas de vulnerabilidade, fornecem informações que auxiliam no diagnóstico ambiental da região.

No Médio Piranhas Potiguar há o predomínio de Neossolos Litólicos Eutróficos, suas associações compreendem uma área de aproximadamente 66% do território (Figura 2). Luvissoles Crômicos Órticos e Planossolos Nátricos Órticos ocorrem em menores proporções.

A maior parte da zona ripária do reservatório é ocupada pela associação de Neossolos Litólicos Eutróficos, Afloramento de Rochas e Neossolos Regolíticos Eutróficos (Figura 2).

Dentre as classes geológicas existentes (Figura 3), ocorrem em maior proporção a Formação Seridó, constituída principalmente por xisto-aluminoso, diorita-xisto, filito, biotita-quartzo-xisto e xisto. Em segunda maior proporção, tem-se a Formação Jucurutu, com o predomínio de gnaisse, mármore, biotita-gnaisse, biotita-xisto, xisto e muscovita-quartzito (CPRM, 2007). Logo, a região é formada predominantemente por rochas metamórficas.

O clima foi representado pelo mapa de intensidade pluviométrica (Figura 4). Considerou-se o período chuvoso de 3 meses por ano, o que resultou em um valor mínimo de intensidade pluviométrica de aproximadamente 183 mm/mês e máximo de 261 mm/mês. Na zona ripária, no extremo sul ocorrem os valores máximos de intensidade pluviométrica, enquanto ao norte os valores diminuem para cerca de 215 mm/mês (ANA, 2016).

No Médio Piranhas Potiguar, o tipo de vegetação predominante é a Savana-Estépica Arborizada, que ocupa quase metade do território (Figura 5). Em segundo lugar, tem-se ocupação por agropecuária, indicando ocupação antrópica. No restante da área tem-se a presença de Savana-Estépica Parque, áreas de agricultura com culturas permanentes e uma menor proporção de área com influência urbana.

A área do Médio Piranhas Potiguar apresenta declividades que classificam o relevo desde plano até forte-montanhoso. A maior parte do território apresenta declividades de 8 a 20% que classificam o relevo como ondulado (Figura 6). Em segunda maior proporção, tem-se declividades de 3 a 8%, representada pelo relevo suave-ondulado. Na zona ripária, predominam baixas declividades, entretanto em pequenas áreas ocorrem altas declividades (Figura 6).

Outro indicador relacionado à geomorfologia é a altimetria. No Médio Piranhas Potiguar, 36% da área apresenta altitude de 100 a 200 m (Figura 7). Altitudes inferiores a 100 m ocorrem em 35% da área, onde está localizado o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves. Em menor proporção, há áreas com maior elevação, chegando até 761 metros.

Com relação ao uso e ocupação do solo, a maior parte do Médio Piranhas Potiguar é ocupado por caatinga (Figura 8). Em seguida, tem-se a ocupação por solo exposto. As demais classes de uso e ocupação do solo ocorrem em menor proporção, sendo: água, agricultura, gramínea e urbano. Na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves foram identificadas as mesmas classes existentes na Unidade de Planejamento Hidrológico.

Figura 2 – Classes de solos existentes na unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

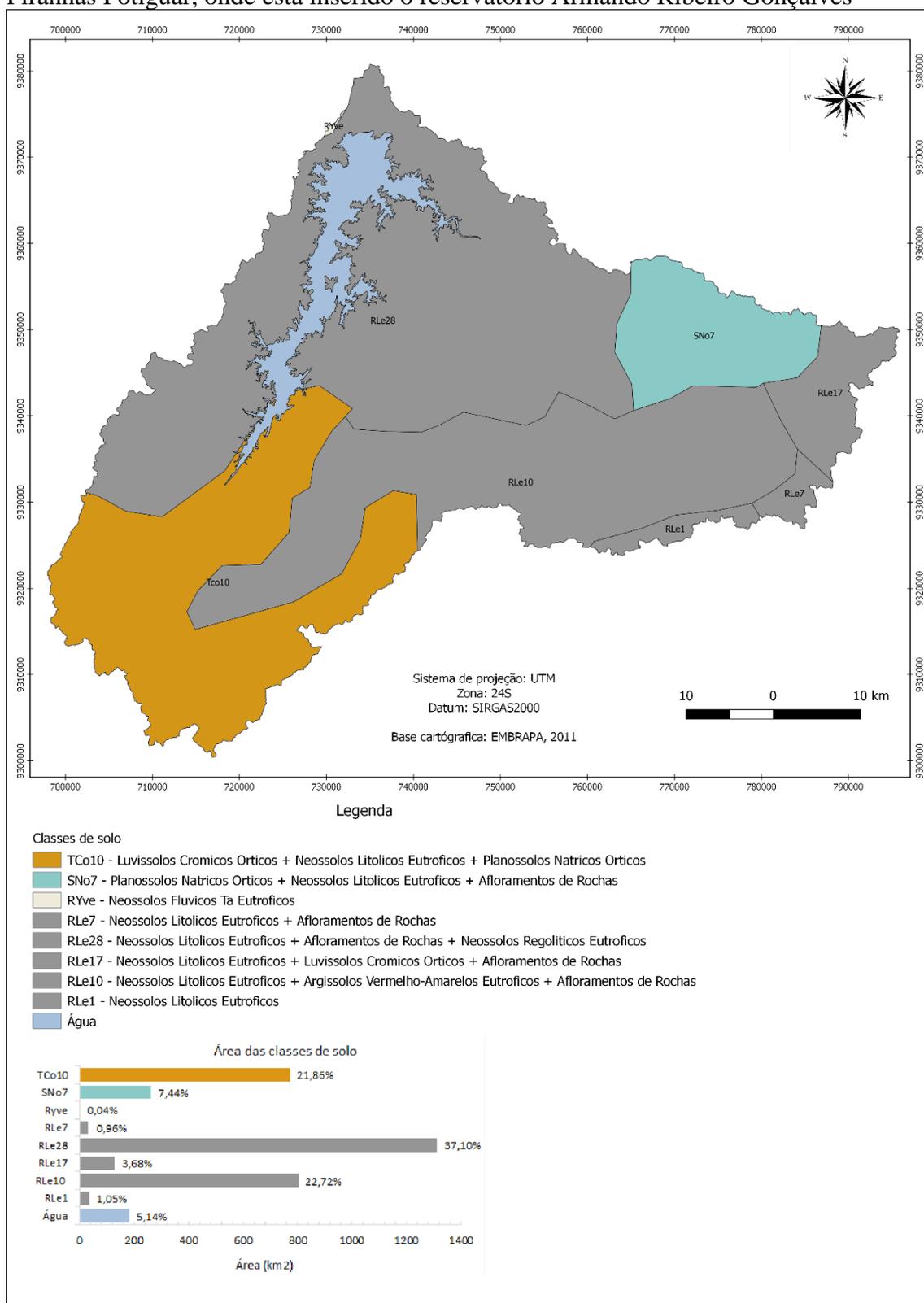


Figura 3 – Geologia da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

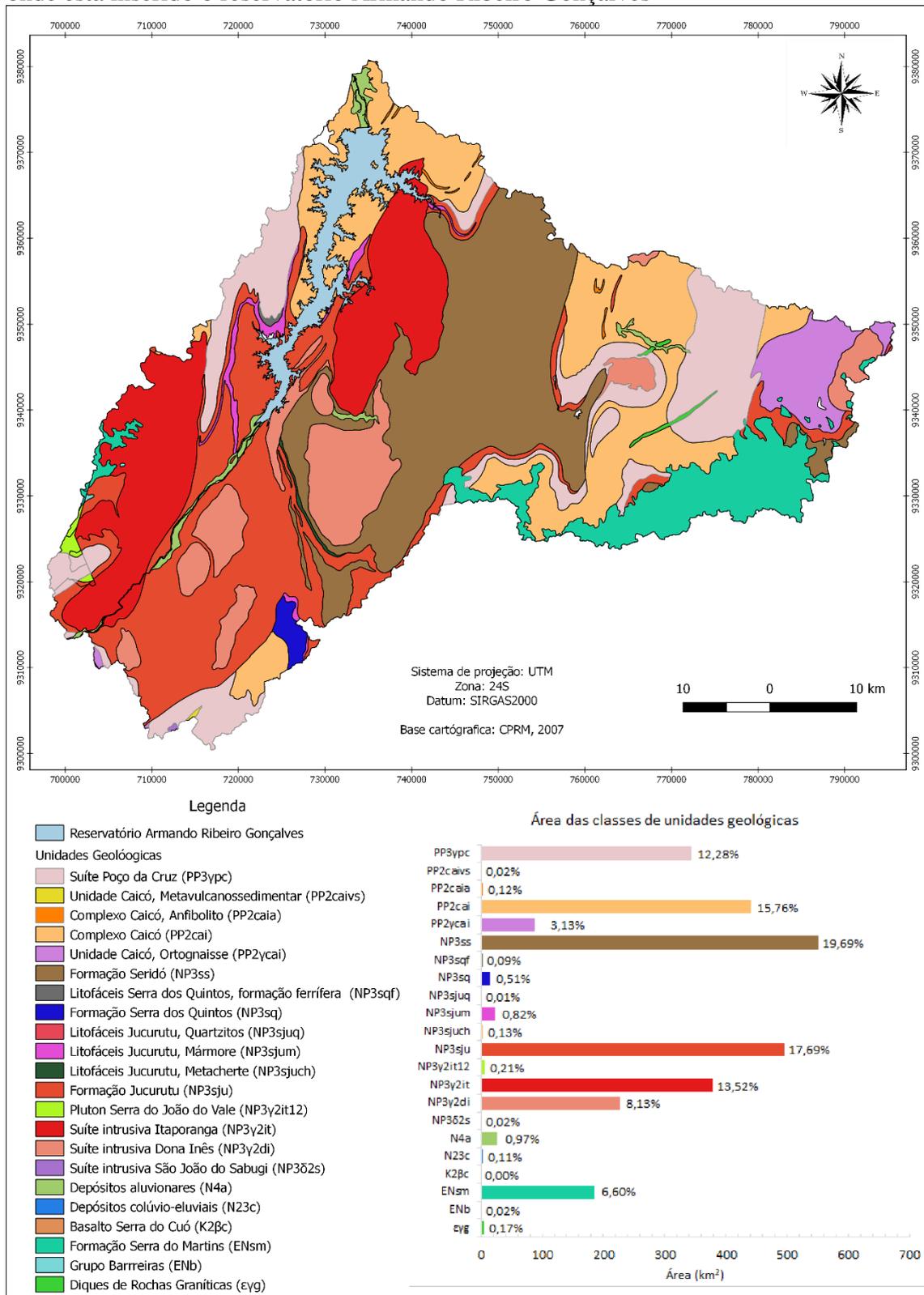


Figura 4 – Intensidade pluviométrica da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

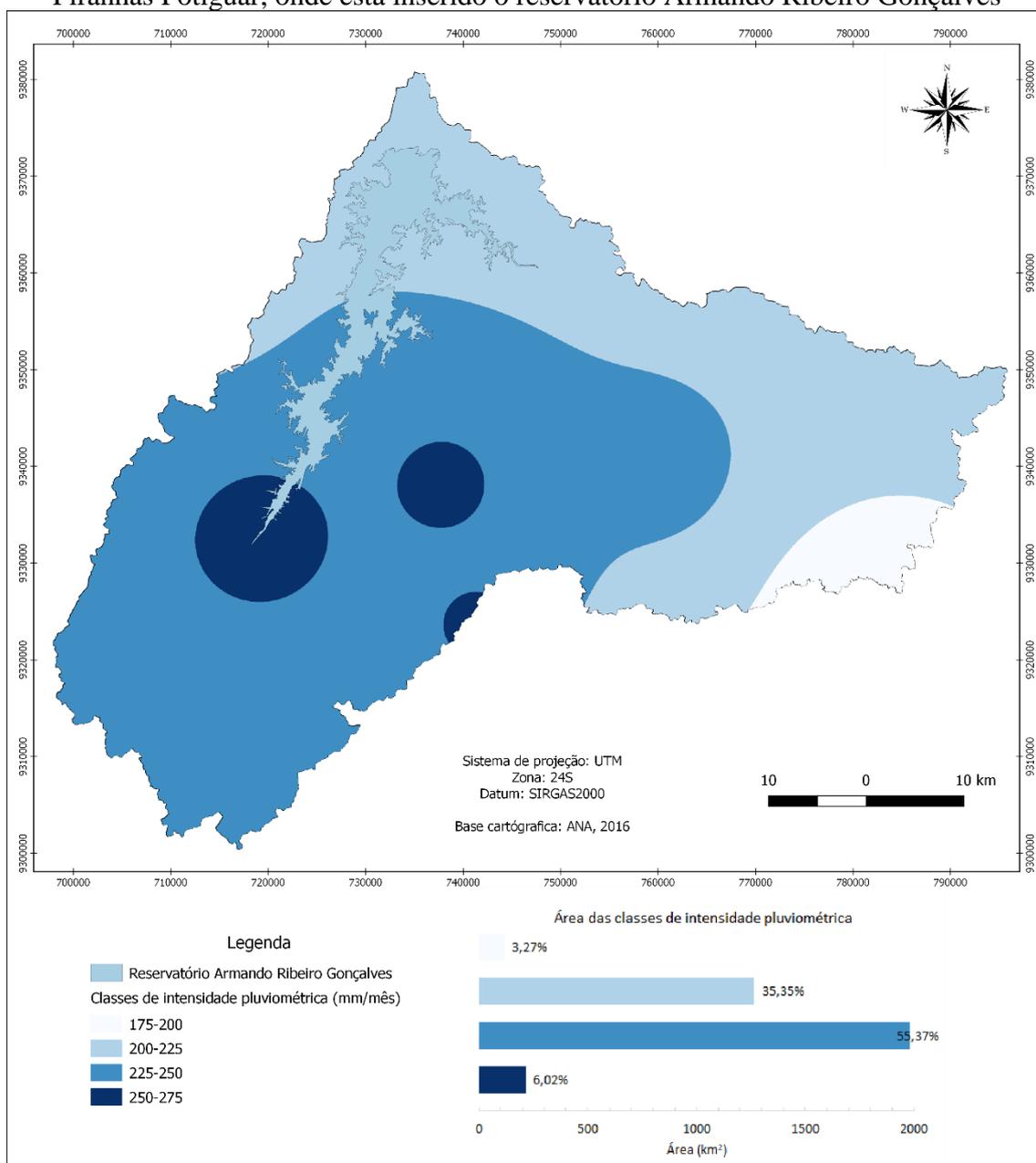


Figura 5 – Cobertura vegetal da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

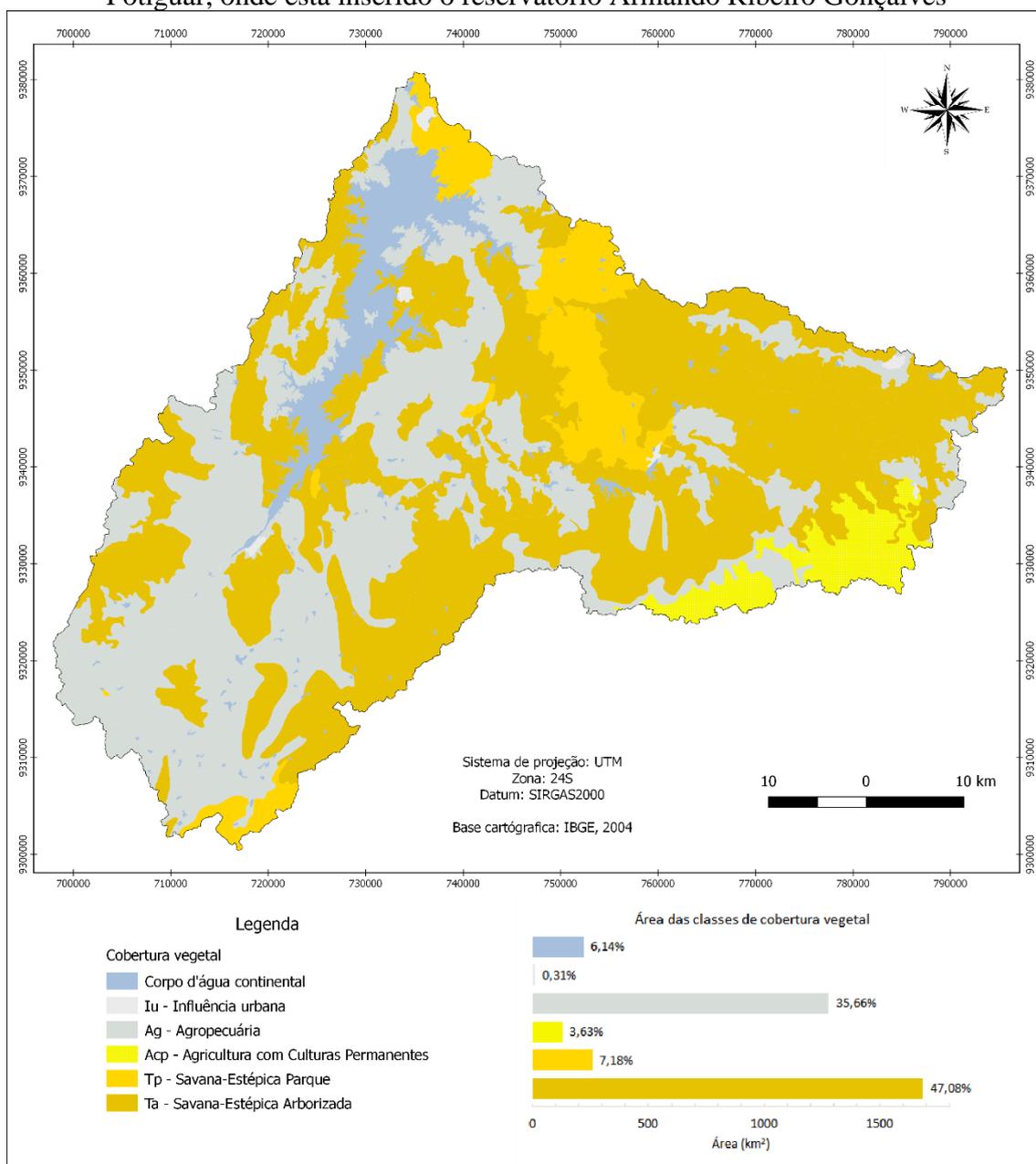


Figura 6 – Classes de declividade da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

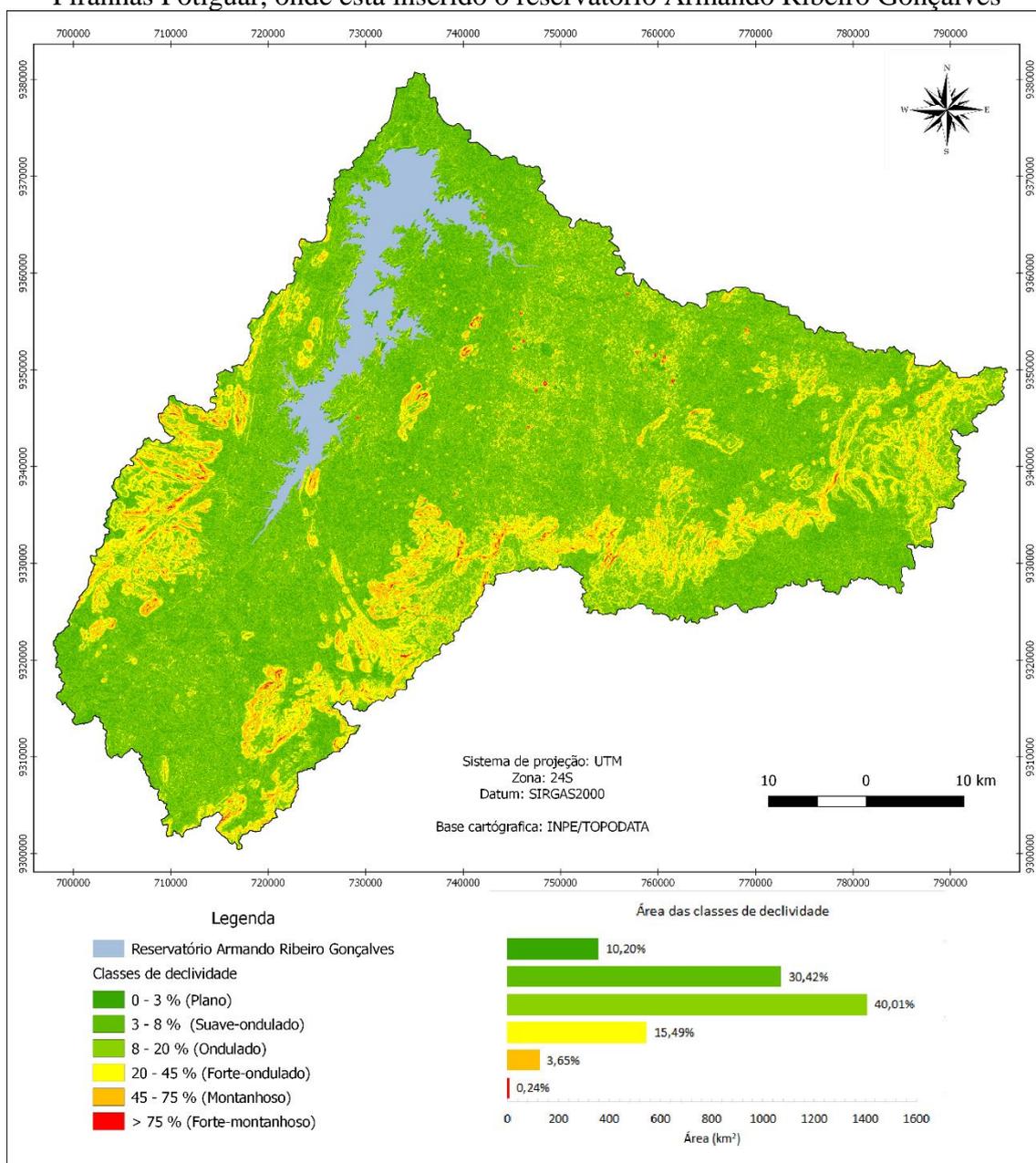


Figura 7 – Altimetria da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

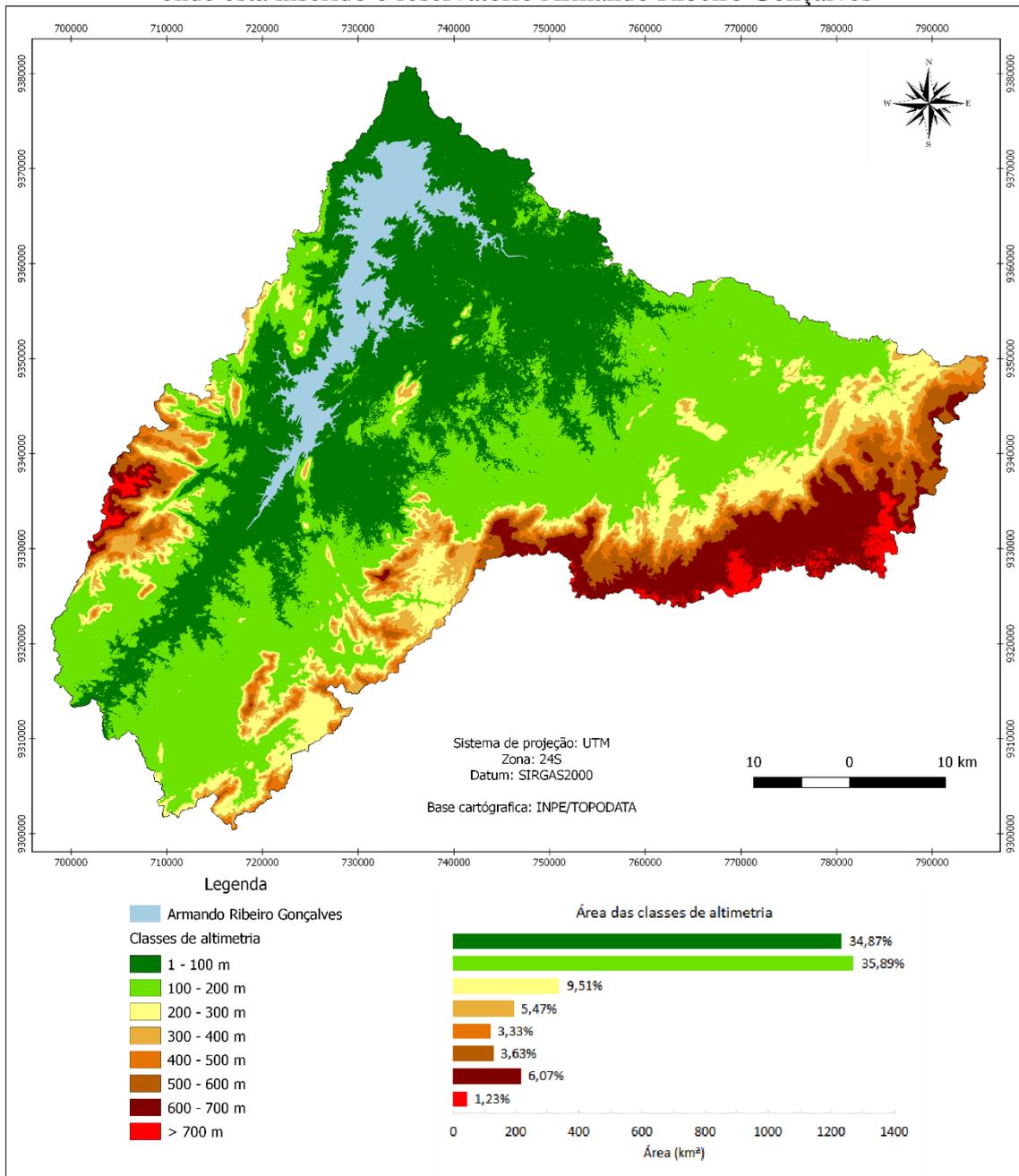
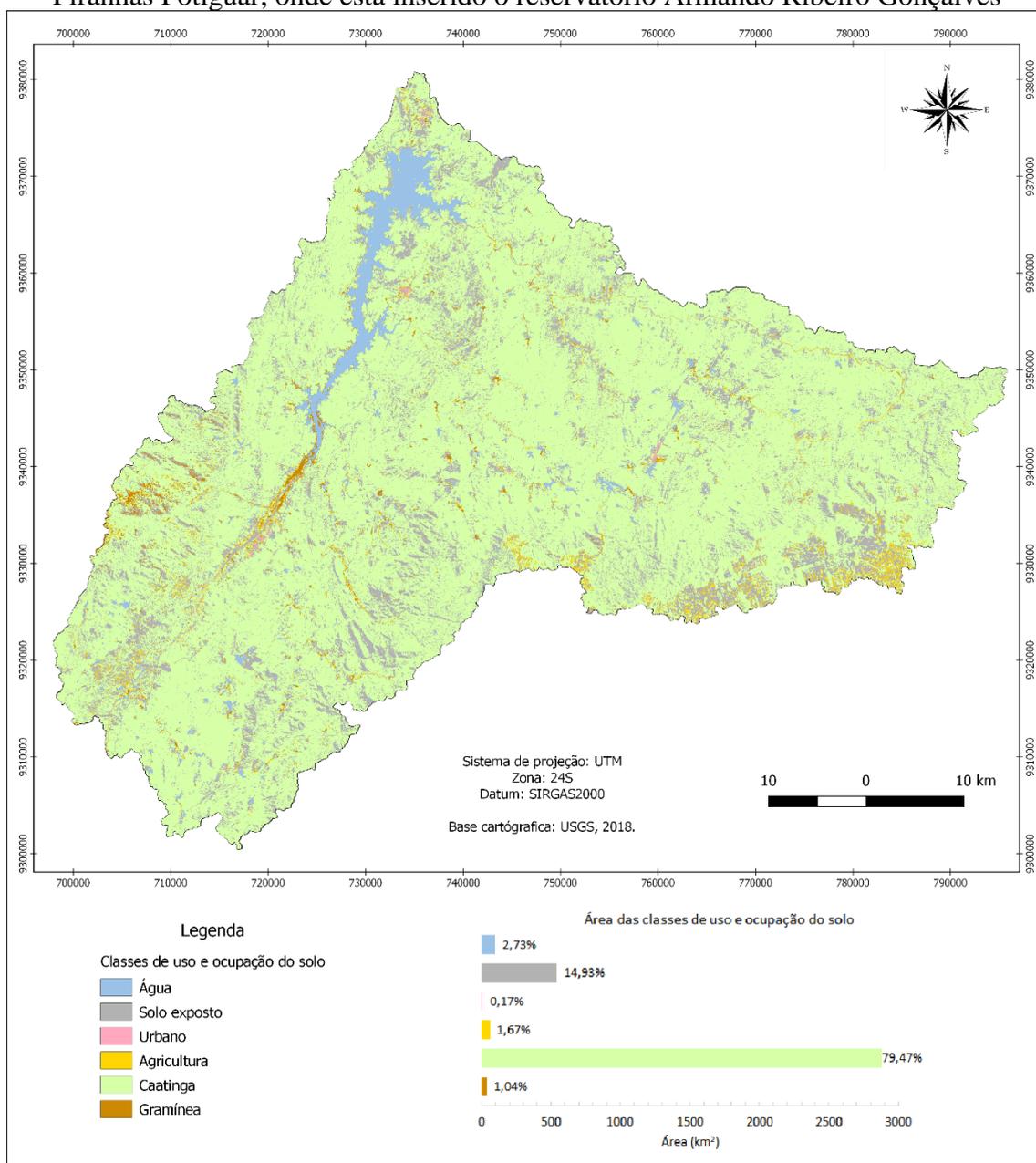


Figura 8 - Uso e ocupação do solo da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves



Os mapas reclassificados (Figura 9) que evidenciaram predominância, ou seja, mais de 50% de áreas entre os graus de vulnerabilidade de médio a muito alto foram os de uso e ocupação > solo > vegetação, respectivamente. Áreas de baixo grau vulnerabilidade são predominantes no mapa de intensidade pluviométrica e o mapa que apresentou maior área de muito baixa vulnerabilidade foi o de geologia (Tabela 5).

Figura 9 – Mapas reclassificados utilizados como indicadores para a geração dos mapas de vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

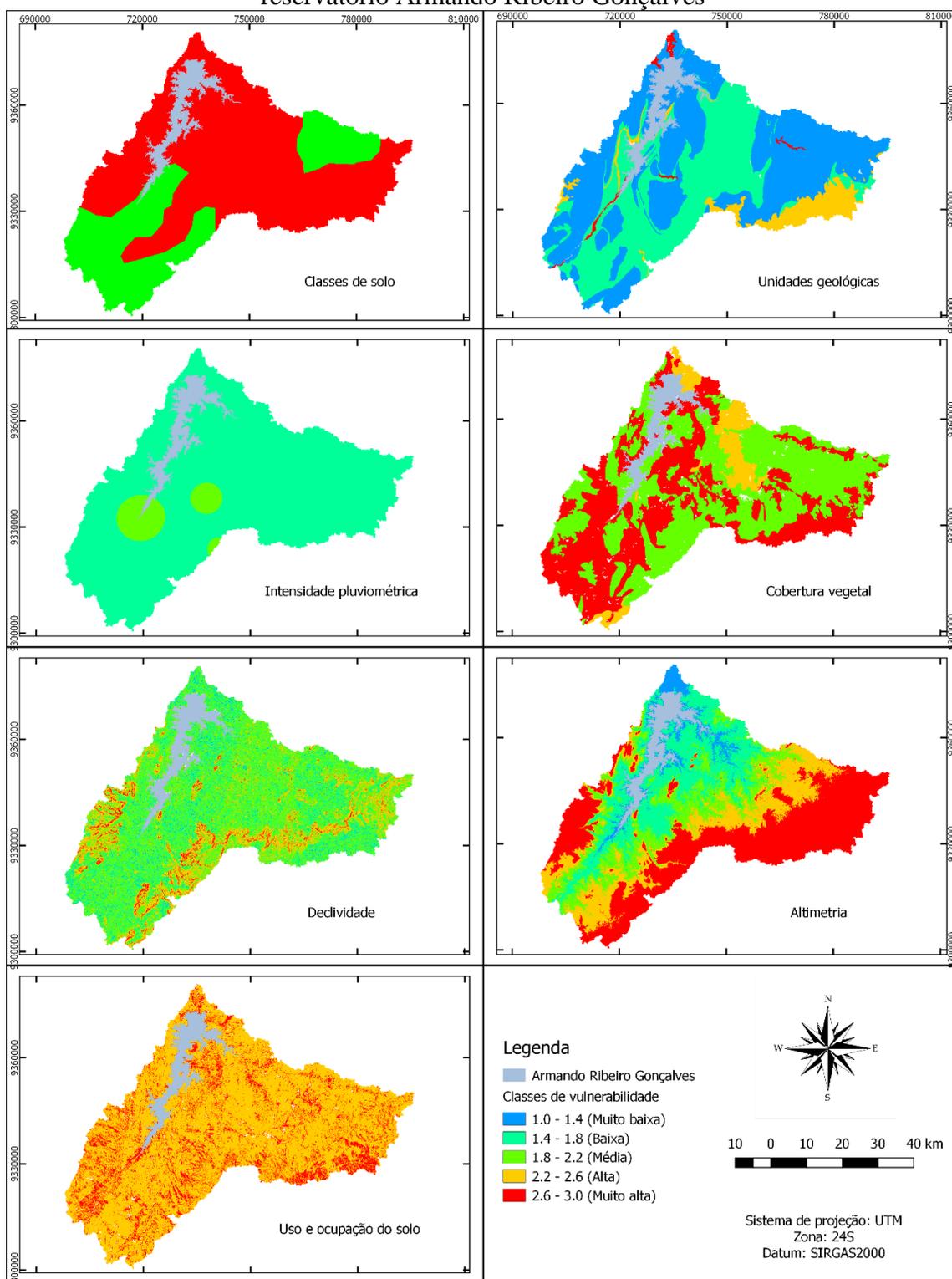


Tabela 5 – Área percentual dos graus de vulnerabilidade dos mapas reclassificados utilizados como indicadores para a geração da vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves Sol = Solos; Geo = Geologia; Int = Intensidade pluviométrica; Veg = Vegetação; Dec = Declividade; Alt = Altimetria; Uso = Uso e ocupação do solo.

Vulnerabilidade	Sol (%)	Geo (%)	Int (%)	Veg (%)	Dec (%)	Alt (%)	Uso (%)
Muito baixa (1,0 - 1,4)	0,00	53,32	0,00	0,00	10,19	9,63	0,00
Baixa (1,4 - 1,8)	0,00	38,16	93,98	0,00	30,42	21,32	0,00
Média (1,8 - 2,2)	30,90	0,00	6,02	50,16	40,01	21,27	0,00
Alta (2,2 - 2,6)	0,00	7,44	0,00	7,65	15,49	13,07	81,69
Muito alta (2,6 - 3,0)	69,10	1,08	0,00	42,19	3,89	34,71	18,31

As características naturais da região proporcionaram graus de vulnerabilidade desde muito baixa até muito alta, sendo que aproximadamente 97 % do território apresenta vulnerabilidade natural média ou alta (Figura 10). O valor máximo de vulnerabilidade obtido foi de 2,82, em uma escala que chega até 3,0.

Diferentemente da área total do Médio Piranhas Potiguar, analisando-se apenas a área da zona ripária, não foram obtidos valores de vulnerabilidade natural muito alta (Figura 11). A classe de vulnerabilidade predominante é a média, seguida da baixa vulnerabilidade. O valor máximo obtido foi 2,47.

Comparando-se o percentual das áreas de vulnerabilidade natural para os dois recortes em estudo (Tabela 6), percebe-se que no Médio Piranhas Potiguar, em geral, a vulnerabilidade é maior, estando entre alta e média. Enquanto na zona ripária a maior parte das áreas encontram-se em um grau de vulnerabilidade média à baixa.

Figura 10 – Vulnerabilidade natural da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

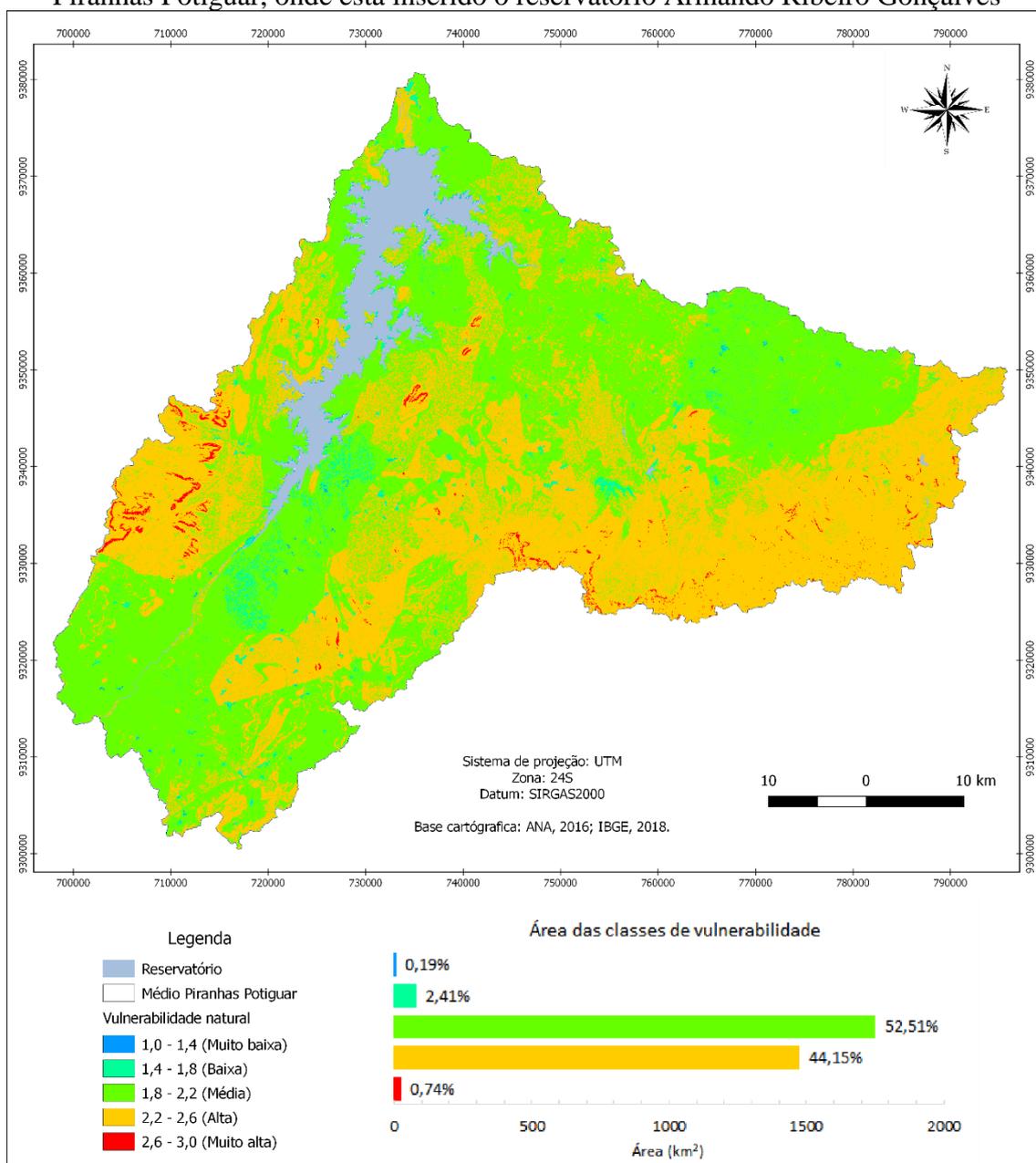


Figura 11 – Vulnerabilidade natural da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado na unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar

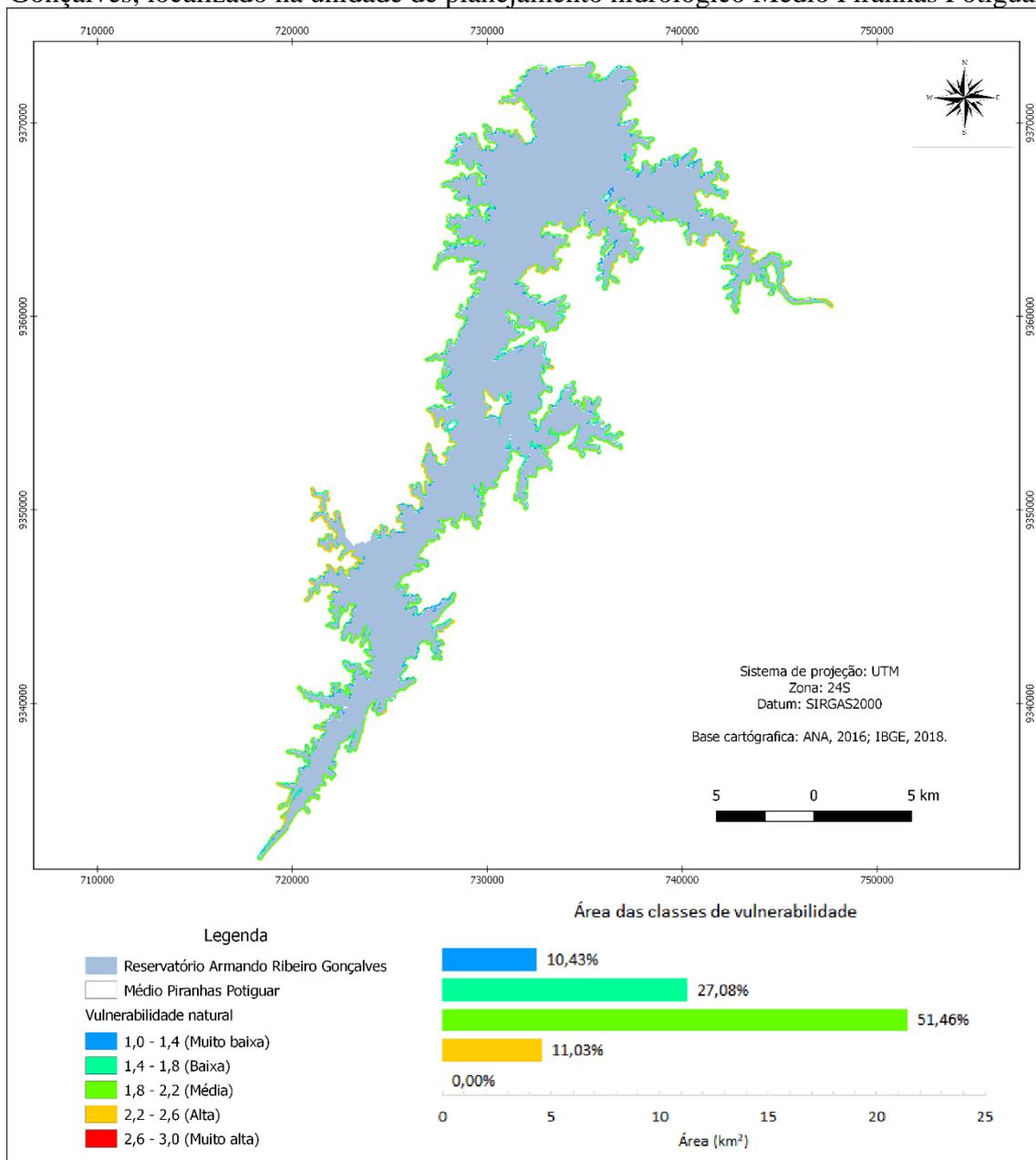
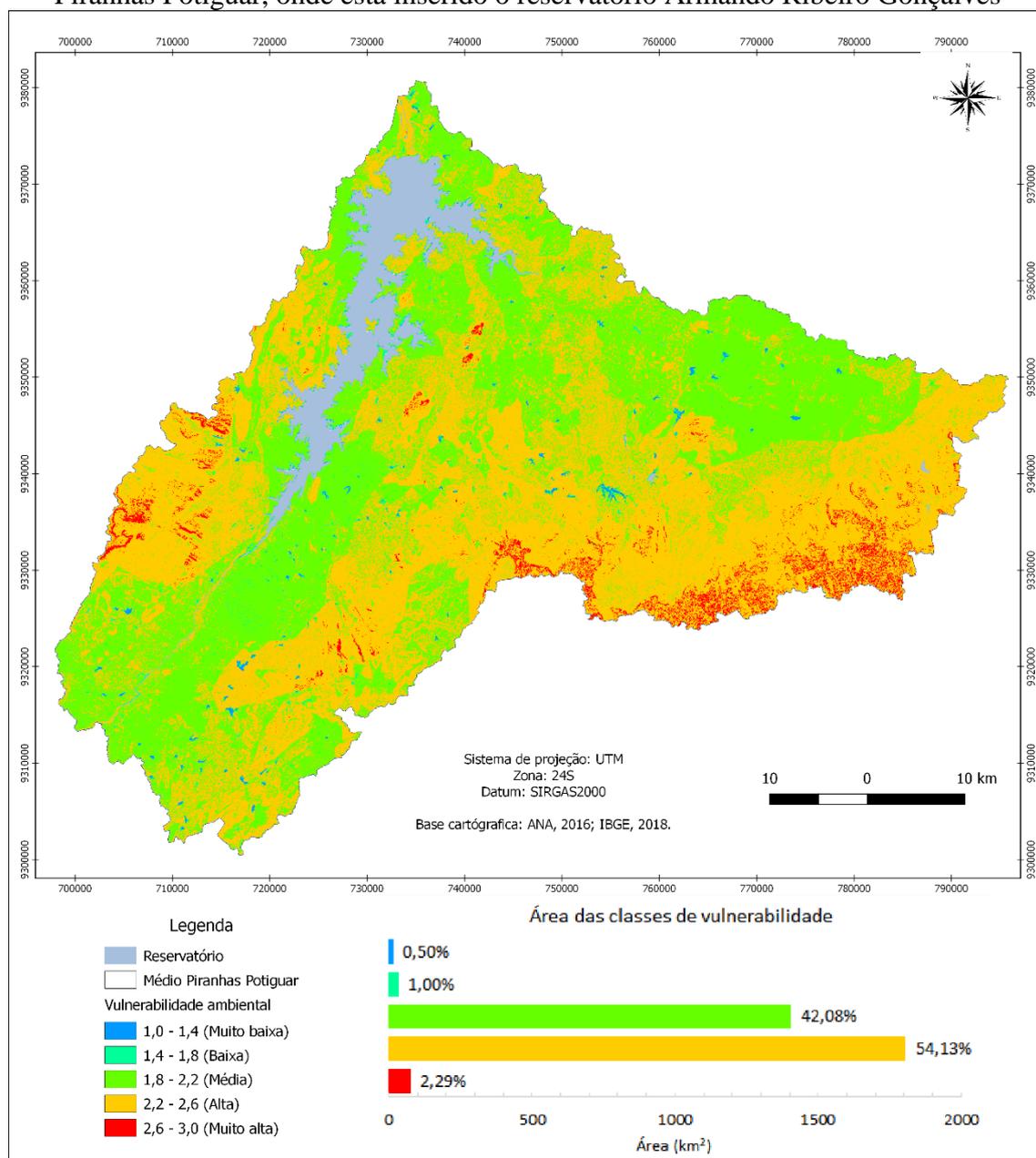


Tabela 6 – Comparação entre as áreas dos graus de vulnerabilidade natural do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Vulnerabilidade Natural	Médio Piranhas Potiguar		Zona ripária	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Muito baixa (1,0 - 1,4)	6,36	0,19	4,65	10,43
Baixa (1,4 - 1,8)	80,24	2,41	12,06	27,08
Média (1,8 - 2,2)	1745,49	52,51	22,92	51,46
Alta (2,2 - 2,6)	1467,46	44,15	4,91	11,03
Muito alta (2,6 - 3,0)	24,55	0,74	0,00	0,00

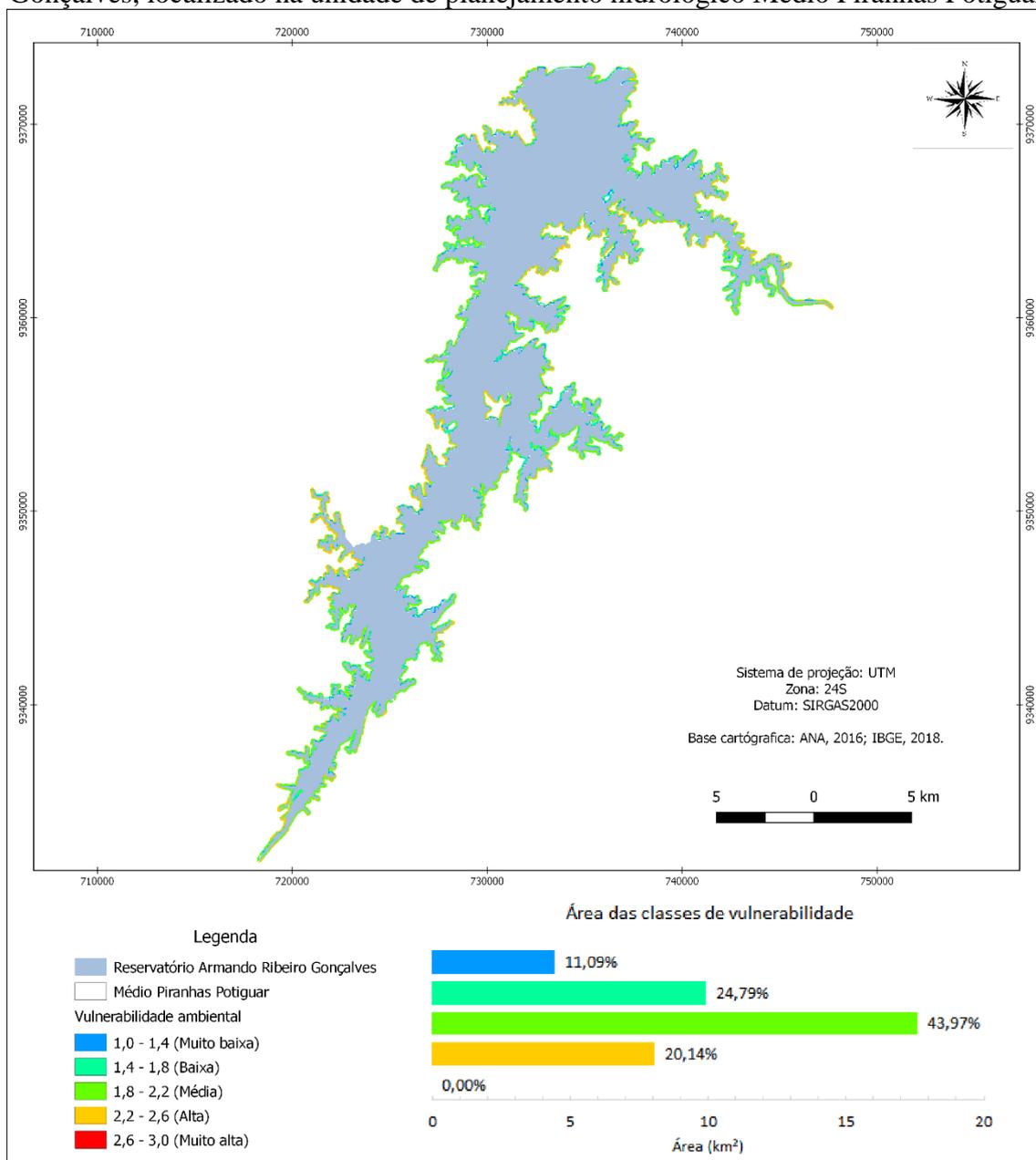
A vulnerabilidade ambiental do Médio Piranhas Potiguar apresentou um predomínio de áreas com alta vulnerabilidade (Figura 12). Juntamente com a classe de média vulnerabilidade, correspondem à aproximadamente 96 % da área em estudo, o restante corresponde a áreas de muito alta vulnerabilidade e em menores proporções à baixa e muito baixa vulnerabilidade ambiental. O valor máximo de vulnerabilidade ambiental para a região foi de 2,88.

Figura 12 – Vulnerabilidade ambiental da unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, onde está inserido o reservatório Armando Ribeiro Gonçalves



Analisando-se a área no entorno do Reservatório (Figura 13), tem-se que a vulnerabilidade ambiental da zona ripária varia de muito baixa à alta, sendo em sua maior parte média, chegando ao valor de 2,58.

Figura 13 – Vulnerabilidade ambiental da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado na unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar



Comparando-se a vulnerabilidade ambiental dessas duas regiões, temos que enquanto na área maior a vulnerabilidade baixa e muito baixa corresponde apenas à 1,5 % da área total, na zona ripária esse valor chega à 35,9 %. O percentual de área com alta vulnerabilidade é aproximadamente 34 % maior no Médio Piranhas Potiguar. Além disso,

não há locais com muito alta vulnerabilidade ambiental na zona ripária, porém no restante da área foram mapeados aproximadamente 76 km².

Tabela 7 – Comparação entre as áreas dos graus de vulnerabilidade ambiental do Médio Piranhas Potiguar e da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Vulnerabilidade Ambiental	Médio Piranhas Potiguar		Zona ripária	
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Muito baixa (1,0 - 1,4)	16,51	0,50	4,71	11,09
Baixa (1,4 - 1,8)	33,35	1,00	10,53	24,79
Média (1,8 - 2,2)	1399,59	42,08	18,68	43,97
Alta (2,2 - 2,6)	1800,32	54,13	8,56	20,14
Muito alta (2,6 - 3,0)	76,27	2,29	0,00	0,00

Analisando-se apenas o Médio Piranhas Potiguar, verifica-se que a vulnerabilidade ambiental, representada pelo acréscimo do uso e ocupação do solo, promoveu um aumento da vulnerabilidade alta e muito alta (Tabela 7).

Tabela 8 – Comparação entre as áreas dos graus de vulnerabilidade natural e ambiental do Médio Piranhas Potiguar

Médio Piranhas Potiguar	Vulnerabilidade natural		Vulnerabilidade ambiental		Incremento (%)
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	
Muito baixa (1,0 - 1,4)	6,36	0,19	16,51	0,50	163,16
Baixa (1,4 - 1,8)	80,24	2,41	33,35	1,00	-58,51
Média (1,8 - 2,2)	1745,49	52,51	1399,59	42,08	-19,86
Alta (2,2 - 2,6)	1467,46	44,15	1800,32	54,13	22,60
Muito alta (2,6 - 3,0)	24,55	0,74	76,27	2,29	209,46

Para a zona ripária a diferença entre a vulnerabilidade natural e a ambiental apresentou menores proporções, apesar de também ter ocorrido aumento da classe de vulnerabilidade alta (Tabela 9).

Tabela 9 – Comparação entre as áreas de vulnerabilidade natural e ambiental da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Zona Ripária	Vulnerabilidade natural		Vulnerabilidade ambiental		Incremento (%)
	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	
Muito baixa (1,0 - 1,4)	4,65	10,43	4,71	11,09	6,33
Baixa (1,4 - 1,8)	12,06	27,08	10,53	24,79	-8,46
Média (1,8 - 2,2)	22,92	51,46	18,68	43,97	-14,55
Alta (2,2 - 2,6)	4,91	11,03	8,56	20,14	82,59
Muito alta (2,6 - 3,0)	0,00	0,00	0,00	0,00	-

4 DISCUSSÃO

Na região semiárida, a pressão pelo uso antrópico do solo no entorno de locais que tenham capacidade de suprir a demanda por água aumenta a vulnerabilidade existente em decorrência de características naturais que podem ampliar a problemática da escassez hídrica dessa região.

Foi identificado que a Unidade de Planejamento Hidrológico Médio Piranhas Potiguar e a zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, são regiões que apresentam média vulnerabilidade natural, na maior parte do seu território.

A pedologia é um dos fatores que mais contribuem para essa questão (Tabela 5). O solo é resultado da integração de diferentes fatores naturais de formação – clima, organismos, material de origem, relevo e tempo – por isso reflete bem as características naturais que influenciam na vulnerabilidade. A classe de solo predominante nessas regiões são os Neossolos Litólicos Eutróficos, caracterizados por serem solos pouco desenvolvidos, com baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos e alta fertilidade (EMBRAPA, 2013). Solos desse tipo são rasos, de textura grosseira e vulneráveis à erosão (CUNHA *et al.*, 2010).

Solos pouco desenvolvidos, possuem ainda grande relação com o material de origem, sendo importante o estudo da gênese das rochas. A análise da geologia no estudo da vulnerabilidade está relacionada ao grau de coesão das rochas, visto que em rochas pouco coesas prevalecem processos de morfogênese, enquanto nas rochas bastante coesas espera-se a ocorrência da pedogênese (CREPANI, 2001), a depender da declividade. As rochas predominantes na região, apresentam valores baixos de vulnerabilidade. Contudo, em áreas com ocorrência de rochas sedimentares, há uma maior susceptibilidade à denudação (CREPANI, 2001) e, portanto, apresentam classe de vulnerabilidade muito alta.

A denudação das rochas é causada principalmente pela ação da chuva que provoca o intemperismo das rochas e a erosão hídrica, sendo a intensidade pluviométrica uma das características mais importantes para o estudo da vulnerabilidade (CREPANI, 2001). Na área de estudo, a vulnerabilidade em decorrência dos valores de intensidade pluviométrica é baixa na maior parte da área. Porém, é importante destacar que no semiárido tropical, os longos períodos de estiagem promovem a ocorrência de intemperismo físico, como o período chuvoso ocorre concentrado em um curto período de tempo, as enxurradas

desencadeiam processos erosivos e transporte de sedimentos (FREITAS, 2007). Esse material transportado pode fazer com que o solo atue como fonte difusa de poluição, pois os materiais carregados, principalmente sedimentos e nutrientes, ao chegarem aos corpos hídricos, podem intensificar os processos de assoreamento e eutrofização, respectivamente (MOURI; TAKIZAWA; OKI, 2011; NGUYEN *et al.*, 2017).

A erosão pode ser minimizada caso tenha-se uma vegetação que proteja o solo contra o impacto da gota de chuva. No entanto, na área de estudo a vegetação nativa é a caatinga, que promove uma baixa cobertura do solo, devido sua fisionomia natural de adaptação ao período de estiagem (BEZERRA JÚNIOR; SILVA, 2007; MMA, 2007). Por isso, a vulnerabilidade em decorrência dos tipos de vegetação existentes foi classificada de média a muito alta, sendo um indicador com influência significativa no cálculo da vulnerabilidade. Além disso, tem-se a questão de que o levantamento da cobertura vegetal (IBGE, 2004) também admite a ocupação das áreas de caatinga por atividades antrópicas, como agropecuária e urbanização, o que corresponde a aproximadamente 36 % do território do Médio Piranhas Potiguar, incluindo algumas áreas de zona ripária, conforme apresentado no mapa de cobertura vegetal (Figura 5). Fato que intensifica o processo de desertificação existente (MMA, 2007), devido a expansão das áreas de solo exposto, que também contribuem para o aumento do escoamento superficial, que ao lavarem áreas agropecuárias e urbanas, carregam nutrientes e contaminantes para o sistema aquático, diminuindo também a qualidade da água.

Outro fator determinante para a ocorrência da erosão é a geomorfologia da região. O conhecimento sobre a declividade e altimetria do terreno permitem avaliar a possibilidade de transformação da energia potencial em energia cinética, responsável pelo transporte de materiais que esculpe as formas de relevo. Os locais com declives ondulados, predominantes na região, representam áreas de elevado risco de erosão (CUMBANE *et al.*, 2015). Apesar da vulnerabilidade devido à altitude ter apresentado mais áreas com muito alta vulnerabilidade, em comparação com os demais graus de vulnerabilidade, esta tem um menor peso de influência no cálculo da vulnerabilidade natural e ambiental, em comparação à declividade. Na vulnerabilidade natural, a declividade foi considerada o principal fator de importância para o cálculo, contribuindo, principalmente, para a ocorrência de um grau de vulnerabilidade médio.

Com relação ao uso e ocupação do solo, apesar da classificação supervisionada ter identificado 79 % de área total do Médio Piranhas Potiguar coberta por caatinga

(Figura 8), boa parte dessa área não é preservada, pois tem-se a ocupação por pecuária extensiva, prática comum no semiárido (PEREIRA; DANTAS NETO, 2014). O pisoteio dos animais promove a compactação do solo, aumentando o escoamento superficial e consequentemente a perda de solo por erosão (PEREIRA; DANTAS NETO, 2014; MEDEIROS, 2016), aumentando também as áreas de solo exposto e a susceptibilidade à desertificação. Essa ocupação existe também na zona ripária, devido ao acesso dos animais à água do manancial, visto que é um reservatório utilizado para usos múltiplos, inclusive dessedentação animal (ANA, 2016). Isso corrobora as áreas de agropecuária identificadas pelo IBGE no mapa de vegetação (Figura 5). A vulnerabilidade devido ao uso e ocupação do solo apresentou apenas áreas de alta e muito alta vulnerabilidade. Isso aliado ao fato de ser o indicador com maior peso de influência no cálculo da vulnerabilidade ambiental, faz com que o uso e ocupação seja o principal responsável pelos altos valores de vulnerabilidade ambiental mapeados na área de estudo.

Analisando-se o mapa de vulnerabilidade natural do Médio Piranhas Potiguar (Figura 10), constata-se que essa é uma área naturalmente muito vulnerável, que necessita de um planejamento ambiental adequado para evitar o aumento da degradação ambiental. As áreas com graus de vulnerabilidade muito alto ou alto coincidem com os locais que apresentam alta declividade, elevada altitude, Neossolos Litólicos e vegetação pouco preservada.

A zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves é uma área que merece ainda mais atenção em razão das suas funções hidrológicas e ecológicas (GONZÁLEZ *et al.*, 2017). Na zona ripária, a vulnerabilidade natural é um pouco menor em relação ao Médio Piranhas Potiguar, devido a menor diversidade das suas características físicas, dada a sua menor extensão territorial, em comparação à unidade de planejamento hidrológico. Mesmo assim, a maior parte da área apresenta média vulnerabilidade natural. Os maiores valores provavelmente estão mais relacionados às áreas de solo exposto e agropecuária.

A intensificação desses usos antrópicos representa uma ameaça para a qualidade ambiental, visto que é uma região naturalmente muito vulnerável. Por isso, é importante o controle do uso e ocupação do solo e a identificação das áreas mais sensíveis e que, portanto, necessitam de manejo mais específico para garantir a manutenção de seus serviços ecossistêmicos.

No Médio Piranhas Potiguar, o uso e ocupação do solo promove a diminuição das áreas de baixa e média vulnerabilidade e aumento das áreas de alta e muito alta

vulnerabilidade (Tabela 8). Percebe-se também um aumento nas áreas de muito baixa vulnerabilidade, no entanto, isso decorre das áreas ocupadas por pequenos corpos hídricos que foram mapeadas no uso e ocupação do solo, mas não são identificadas nos demais mapas. Como a água recebe valor nulo, na álgebra de mapas, a média resulta em valores de muito baixa vulnerabilidade, que não correspondem à realidade.

No Médio Piranhas Potiguar, o valor máximo de vulnerabilidade ambiental obtido foi 0,06 maior que o valor máximo de vulnerabilidade natural. Para a zona ripária esse valor foi 0,11. Isso indica que o uso e ocupação do solo por atividades antrópicas possui um potencial degradador maior na zona ripária, possivelmente em decorrência do maior adensamento de usos nessa área, por ser a principal reserva hídrica da região e atender a usos múltiplos (ANA, 2016).

Os resultados deste trabalho constataam que a ocupação antrópica aumenta a vulnerabilidade existente, conforme também identificado em outros estudos (FIGUEIRÊDO *et al.*, 2007; CHOUDHARY; SINGH; KUPRIYANOV, 2018). As áreas susceptíveis à desertificação apresentaram 40,8 % de sua área antropizada (MMA, 2007).

Áreas classificadas como alta e muito alta vulnerabilidade ambiental deveriam ser áreas prioritárias para manutenção e recuperação ambiental. Sobretudo as zonas ripárias, em virtude da sua importância ecológica, social e econômica (GONZÁLEZ *et al.*, 2017). Entretanto, apenas a preservação da faixa que compreende a zona ripária não é suficiente para garantir a qualidade ambiental da área, visto que, em seu entorno existem áreas de muito alta vulnerabilidade, com potencial de promover a degradação ambiental, pois fazem parte da rede de drenagem da bacia. Logo, em reservatórios localizados no semiárido, cujas sub-bacias apresentam grandes áreas com diversidade física-territorial e ocupação antrópica é pouco provável que uma APP de 100 metros seja suficiente para tamponar os processos de degradação ao longo de toda a bacia hidrográfica.

A identificação de áreas ambientalmente vulneráveis tem importância local, regional e global, sendo necessário inserir essa temática na realidade das políticas públicas, para a promoção de práticas ambientalmente sustentáveis e de medidas de recuperação de áreas degradadas (AQUINO; PALETTA; ALMEIDA, 2017). No Brasil, o Código Florestal (BRASIL, 2012b), institui que a localização da área de Reserva Legal no imóvel rural deverá levar em consideração, dentre outros critérios, as áreas de maior fragilidade ambiental, ou seja, as de maior vulnerabilidade.

A caracterização e a quantificação da vulnerabilidade de uma determinada região representada na forma de mapas temáticos, permite a visualização espacial dos graus de

vulnerabilidade, facilitando a interpretação das informações, contribuindo para estudos e questões ambientais.

5 CONCLUSÃO

A expansão do uso e ocupação do solo aumenta o grau de vulnerabilidade natural esperado para região semiárida tropical.

Solo, cobertura vegetal e uso e ocupação são os fatores que mais influenciam a determinação da vulnerabilidade da região como média a muito alta.

A redução da cobertura vegetal nativa como um dos fatores determinantes para o aumento da vulnerabilidade ressalta a importância da preservação das zonas ripárias.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016.

ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.

ANGELIM, L. A. de A. *et al.* **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM, 2006.

AQUINO, A. R. de; PALETTA, F. C.; ALMEIDA, J. R. DE. **Vulnerabilidade ambiental**. São Paulo: Blucher, 2017.

BEZERRA JÚNIOR, J. G. O.; SILVA, N. M. da. Caracterização geoambiental da microrregião do Seridó Oriental do Rio Grande do Norte. **Holos**, v. 2, n. 23, p. 78–91, 2007.

BRASIL. **Lei nº 12651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2012b.

BRASIL. **Lei nº 12727, de 17 de outubro de 2012**. Altera a Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei no 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2o do art. 4o da Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012. Brasília: Presidência da República, 2012a.

CABRAL, J. B. P. *et al.* Mapeamento da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Doce (GO), utilizando técnicas de geoprocessamento. **GeoFocus**, n. 11, p. 51–69, 2011.

CHOUDHARY, K.; SINGH, M.; KUPRIYANOV, A. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences Spatial modelling for natural and environmental vulnerability through remote sensing and GIS in Astrakhan , Russia. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences**, v. 21, n. 2, p. 139–147, 2018.

COMPANHIA DE PESQUISAS EM RECURSOS MINERAIS (CPRM). Serviço Geológico do Brasil. **Mapa geológico do estado do Rio Grande do Norte**. Escala 1:500.000. 2007.

CREPANI, E. *et al.* **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CUIABANO, M. do N. *et al.* Vulnerabilidade ambiental à erosão hídrica na sub-bacia do córrego do guanabara/ reserva do cabaçal-MT Brasil. **Geociencias**, v. 36, n. 1, p. 138–153, 2017.

CUMBANE, B. L. *et al.* **Aplicação de Sistemas de Informação Geográfica para a determinação do Potencial Natural de Erosão dos solos no Distrito de Sussundenga - Moçambique**. Universidade Técnica de Lisboa, 2015.

CUNHA, T. J. F. *et al.* Principais solos do Semiárido tropical brasileiro: caracterização, potencialidades, limitações, fertilidade e manejo. In: Iêdo Bezerra Sá; Pedro Carlos Gama da Silva (Ed.). **Semiárido brasileiro: pesquisa desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. Cap. 2. p. 49-88.

DINIZ, M. T. M.; OLIVEIRA, G. P. de. Compartimentação e caracterização das unidades de paisagem do Seridó Potiguar. **Brazilian Geographical Journal**, v. 6, p. 291–318, 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento exploratório - Reconhecimento de solos do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN, 1971.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Mapa de solos do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro, 83p., 1979.

FIGUEIRÊDO, M. C. B. de *et al.* Avaliação da vulnerabilidade ambiental de reservatórios à eutrofização. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 399–409, 2007.

FREITAS, M. W. D. de. **Estudo integrado da paisagem no sertão pernambucano (NE-Brasil) com o uso de sistemas de informação geográfica e sensoriamento remoto**. São José dos Campos: INPE, 2007.

FUSHIMI, M. *et al.* Vulnerabilidade ambiental e aplicação de técnicas de contenção aos processos erosivos lineares em áreas rurais do município de Presidente Prudente-SP. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 4, p. 343–356, 2013.

GONZÁLEZ, E. *et al.* Integrative conservation of riparian zones. **Biological Conservation**, v. 211, p. 20–29, 2017.

HENTATI, A. *et al.* Evaluation of sedimentation vulnerability at small hillside reservoirs in the semi-arid region of Tunisia using the Self-Organizing Map. **Geomorphology**, v. 122, n. 1–2, p. 56–64, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual**

- Técnico de Uso da Terra**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171 p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de vegetação do Brasil**. Escala 1:5.000.000. 3 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2004.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **TOPODATA**, banco de dados geomorfométricos do Brasil. São Paulo, n.d.
- MEDEIROS, C. E. B. F. de S. **Os impactos do uso e ocupação e evento de seca extrema na qualidade da água e do solo de um manancial tropical semiárido**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
- METZGER, M. J. *et al.* The vulnerability of ecosystem services to land use change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 114, n. 1, p. 69–85, 2006.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Atlas de áreas susceptíveis a desertificação no Brasil**. Santana, M.O. (Org.). Brasília: MMA, 2007. 134 p.
- MIRHOSSEINI, M. *et al.* Changing land use a threat to surface water quality: a vulnerability assessment approach in Zanzanroud Watershed , Central Iran 1. **Water Resources**, v. 45, n. 2, p. 268–279, 2018.
- MOTA, L. H. da S. DE O.; VALLADARES, G. S. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 1, p. 39–50, 2011.
- MOURI, G.; TAKIZAWA, S.; OKI, T. Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 7, p. 1837–1848, 2011.
- NGUYEN, H. H. *et al.* Modelling the impacts of altered management practices, land use and climate changes on the water quality of the Millbrook catchment-reservoir system in South Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 1–11, 2017.
- PEREIRA, R. A.; DANTAS NETO, J. Efeito das atividades agropastoris sobre os atributos físico-químicos de três classes de solos de uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro. **Bol. Goia. Geogr.**, v. 34, n. 1, p. 169–188, 2014.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia - DG-FFLCH-USP**. São Paulo, v. 8, p. 63-74, 1994.
- SANTOS, H. G. dos *et al.* O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. **Embrapa**, p. 67, 2011.
- SCHARSICH, V. *et al.* Analysing land cover and land use change in the Matobo National Park and surroundings in Zimbabwe. **Remote Sensing of Environment**, v. 194, p. 278–286, 2017.

TAGLIANI, C. R. A. Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um sistema geográfico de informações. **Anais XI SBSR**, v. 0, p. 1657–1664, 2003.

TERRA, L. G. *et al.* Geoprocessamento algébrico utilizado na caracterização da fragilidade ambiental do município de Santiago-RS. **Caminhos da Geografia**, v. 17, n. 57, p. 167–174, mar. 2016.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Recursos naturais e meio ambiente. Rio de Janeiro: IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977. 91 p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Earth explorer**. 2018. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 11 fev. 2018.

ZHAO, J. *et al.* Environmental vulnerability assessment for mainland China based on entropy method. **Ecological Indicators**, v. 91, p. 410–422, 2018.

CAPÍTULO 2 - ATRIBUTOS DO SOLO EM ÁREAS DE USO ANTRÓPICO NA ZONA RIPÁRIA DE UM RESERVATÓRIO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

O uso e ocupação do solo por atividades antrópicas que utilizam um manejo inadequado do ambiente provocam alterações nas características naturais do solo, podendo degradar sua qualidade física, química e biológica. As consequências dessa degradação podem se estender aos corpos hídricos, devido ao transporte de sedimentos e nutrientes pela erosão, transformando o solo em uma fonte difusa de contaminação para mananciais superficiais. Nesse contexto, a preservação das zonas ripárias torna-se essencial, especialmente em regiões semiáridas tropicais, onde o solo é naturalmente susceptível à erosão, devido às características do solo, o clima e o tipo de vegetação nativa existente. Entretanto, nota-se a expansão da ocupação dessas áreas por atividades potencialmente degradantes. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta dos atributos físicos e químicos do solo promovidas pelo uso e ocupação na zona ripária do Reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado no semiárido brasileiro. Para isso, foi realizada a classificação supervisionada do uso e ocupação do solo por meio de técnicas de geoprocessamento, e a coleta de amostras de solo e análise dos seus atributos físicos e químicos, tendo como referência de qualidade o solo sob vegetação nativa. Foram identificadas as seguintes classes de uso e ocupação: pecuária, urbanização, gramínea, terreno preparado e caatinga. Os resultados indicaram que todos os usos antrópicos modificam as características naturais do solo, tornando-o mais susceptível à erosão. A pecuária e a urbanização são os usos com maior potencial de promover a degradação do solo. Nesses usos, os atributos químicos são mais significativamente alterados, enquanto os usos agrícolas estiveram mais relacionados à degradação física do solo. Os resultados desse trabalho evidenciam a necessidade do planejamento do uso e ocupação do solo e estabelecimento de manejos mais adequados das atividades antrópicas realizadas na região.

Palavras-chave: uso e ocupação do solo, degradação ambiental, erosão.

CHAPTER 2 - SOIL ATTRIBUTES IN AREAS OF ANTHROPIC USE IN THE RIPARIAN AREA OF A RESERVOIR IN THE BRAZILIAN SEMI-ARID

ABSTRACT

The land use by anthropic activities that use an inadequate management of the environment causes alterations in the natural characteristics of the soil, which can degrade its physical, chemical and biological quality. The consequences of this degradation can extend to the water bodies, due to the transport of sediments and nutrients by erosion, transforming the soil into a diffuse source of contamination to surface water sources. In this context, the preservation of riparian zones becomes essential, especially in semiarid tropical regions, where soil is naturally susceptible to erosion due to the soil characteristics, climate and native vegetation type. However, the expansion of occupation of these areas by potentially degrading activities can be noted. In this context, the objective of this research was to evaluate the response of soil physical and chemical attributes promoted by the land use in the riparian zone of the *Armando Ribeiro Gonçalves* Reservoir, located in the Brazilian semiarid region. For this, the supervised classification of land use was carried out by means of geoprocessing techniques, and the collection of soil samples and analysis of their physical and chemical attributes, having as reference of quality the soil under native vegetation. The following classes of land use were identified: livestock, urbanization, grassland, prepared land and *caatinga*. The results indicated that all the anthropic uses modify the natural characteristics of the soil, making it more susceptible to erosion. Livestock and urbanization are the uses with the greatest potential to promote soil degradation. In these uses, chemical attributes are more significantly altered, while agricultural uses have been more related to physical soil degradation. The results of this work show the need of planning the land use and establishing more adequate management of the anthropic activities carried out in the region.

Keywords: land use, environmental degradation, erosion.

1 INTRODUÇÃO

A substituição da vegetação nativa por atividades antrópicas modifica a paisagem e diminui a qualidade dos sistemas ambientais. O uso e ocupação do solo por atividades agropecuárias e urbanização, modifica as características naturais do solo, podendo alterar suas propriedades físicas, químicas e biológicas, e degradar sua qualidade (ISLAM; WEIL, 2000; KARLEN; RICE, 2015; SAMANI *et al.*, 2018). Em geral, os principais efeitos físicos dessas atividades sobre os solos são: aumento da compactação, diminuição da porosidade, aumento da densidade, diminuição da taxa de infiltração e diminuição da estabilidade de agregados, resultando no aumento da erodibilidade do solo (ISLAM; WEIL, 2000; GEISSEN *et al.*, 2009; WANG *et al.*, 2018). Do ponto de vista químico, é comum a alcalinização, salinização e sodificação do solo, além da redução da matéria orgânica e enriquecimento por nutrientes e contaminantes (BARROS; CHAVES, 2014; NABIOLLAHI *et al.*, 2017)

A erosão facilita o transporte de sedimentos e nutrientes até os corpos hídricos. Assim, as consequências de alterações do uso e ocupação não se restringem ao solo, podendo ser estendidas também para os sistemas aquáticos (CANTÓN *et al.*, 2011; MOURI, 2015; BOTERO-ACOSTA *et al.*, 2017; NGUYEN *et al.*, 2017; MIRHOSSEINI *et al.*, 2018). Nesse caso, o solo atua como fonte difusa de contaminação dos mananciais superficiais, aumentando o risco de assoreamento e eutrofização desses sistemas (MOURI; TAKIZAWA; OKI, 2011; NGUYEN *et al.*, 2017).

Esse risco diminui caso exista uma zona ripária preservada (GONZÁLEZ *et al.*, 2017). Localizadas no entorno de mananciais, as zonas ripárias abrigam a vegetação ciliar e desempenham importantes funções ecológicas, tais como a estabilização do solo nas margens, diminuindo a erosão; o fornecimento de matéria orgânica, proveniente da própria vegetação; o aumento do potencial de drenagem do solo; a purificação da água; e o controle da poluição por fontes difusas (GUO *et al.*, 2013; HALE *et al.*, 2014; GONZÁLEZ *et al.*, 2017). No Brasil, as zonas ripárias são consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP), instituídas por Lei (BRASIL, 2012a). Contudo, a maior parte da legislação, tanto brasileira como internacional, que trata sobre zonas ripárias, concentra-se na qualidade da água, negligenciando a importância de ecossistemas não aquáticos, tais como o solo (GONZÁLEZ *et al.*, 2017).

No semiárido brasileiro, o uso e ocupação do solo de zonas ripárias sem manejo adequado é uma realidade comum (OLIVEIRA, 2012; FERREIRA, 2015; MEDEIROS,

2016). Regiões semiáridas tropicais são áreas naturalmente susceptíveis à degradação ambiental, devido às suas características ambientais (CAMMERAAT; CERD; IMESON, 2010; PEREIRA; DANTAS NETO, 2014). Neste caso, os solos rasos, pouco desenvolvidos, aliados à escassez hídrica com chuvas concentradas em um curto período de tempo, e a caatinga, vegetação nativa, escassa e rala (BARBOSA *et al.*, 2012; PEREIRA; DANTAS NETO, 2014), facilitam a perda de solo por erosão.

Nas zonas ripárias, onde legalmente a preservação da cobertura vegetal nativa é obrigatória, a contribuição das atividades antrópicas para a degradação do solo pode ser avaliada por meio da análise comparativa dos atributos físicos e químicos do solo sob diferentes usos, tendo como referência de qualidade o solo sob vegetação nativa. A qualidade do solo está relacionada à sua capacidade de funcionar como um ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e sustentar a sobrevivência humana (KARLEN *et al.*, 1997; BÜNEMANN *et al.*, 2018).

Estudos avaliando a degradação do solo em áreas circunvizinhas a mananciais de abastecimento, identificaram a pecuária e agricultura como principais fatores antrópicos de degradação dessas áreas, ampliando o potencial de atuação do solo como fonte difusa de poluição dos ecossistemas aquáticos (OLIVEIRA, 2012; FERREIRA, 2015; MEDEIROS, 2016; COSTA *et al.*, 2018). Esses resultados são corroborados em estudos que revelam também a perda da qualidade da água em reservatórios cuja zona ripária é explorada para os mais diversos usos antrópicos (OLIVEIRA, 2012; OLIVEIRA, 2013; MIRANDA, 2014; FERREIRA, 2015; MEDEIROS, 2016).

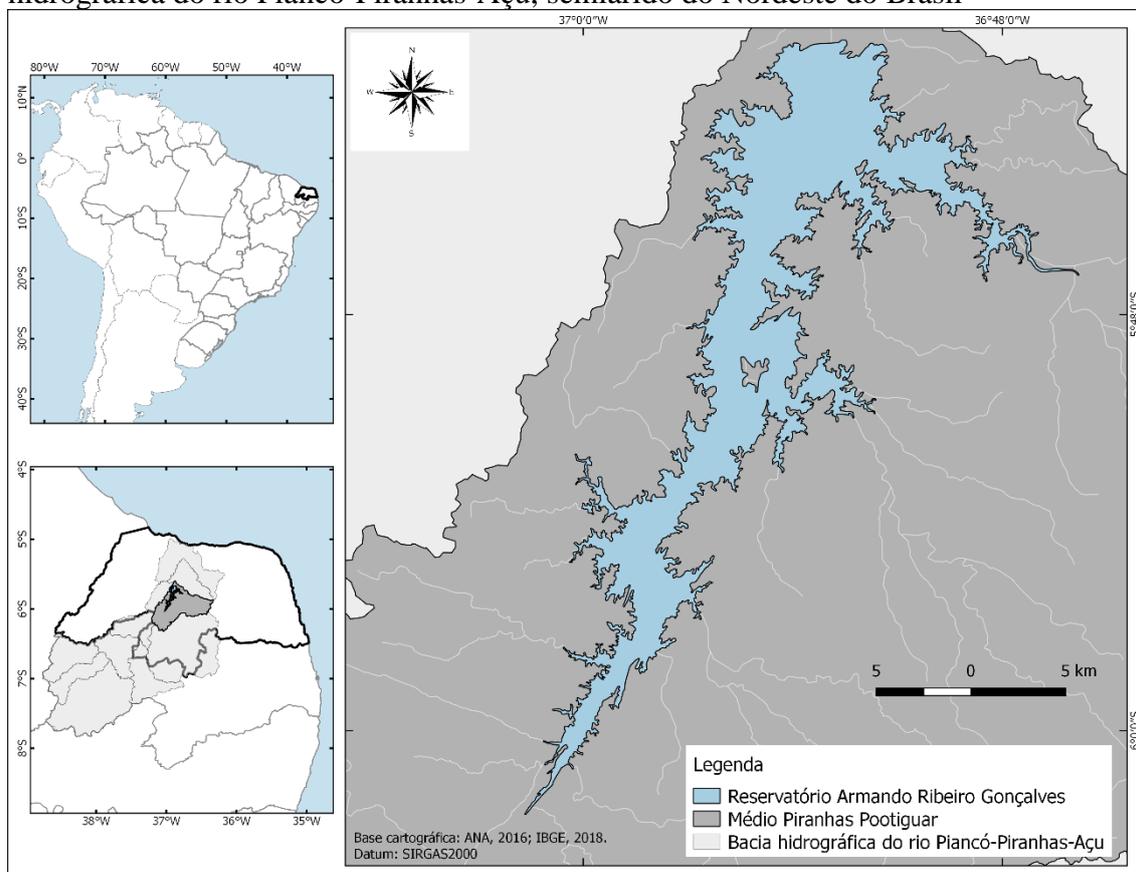
Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta dos atributos físicos e químicos do solo promovidas pelo uso e ocupação na zona ripária do Reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado no semiárido brasileiro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho é a zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, localizado na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu, semiárido do Nordeste do Brasil (Figura 14). Formado pelo barramento do rio Piranhas, esse reservatório está inserido na unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar.

Figura 14 – Localização do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, pertencente a unidade de planejamento hidrológico Médio Piranhas Potiguar, localizado na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu, semiárido do Nordeste do Brasil



A zona ripária corresponde à área de preservação permanente (BRASIL, 2012a), adotada como uma faixa de 100 metros no entorno do manancial, por se tratar de um reservatório artificial destinado ao abastecimento público (BRASIL, 2012b).

O reservatório Armando Ribeiro Gonçalves possui capacidade máxima de 2,4 bilhões de m^3 , constituindo-se a maior reserva hídrica superficial do estado, utilizada para abastecimento humano, aquicultura, indústria, irrigação e dessedentação animal, totalizando uma demanda de água de aproximadamente $16,7 m^3/s$ (ANA, 2016). É responsável pelo abastecimento de diversas sedes urbanas localizadas no Rio Grande do Norte, inclusive fora da bacia do rio Piancó-Piranhas-Açu, atendendo uma população de aproximadamente 164000 habitantes (ANA, 2016).

Esse manancial foi selecionado para receber as águas do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional (ANA, 2016), o que aumenta sua importância estratégica, e a possibilidade de desenvolvimento de

projetos que auxiliem na manutenção da qualidade ambiental da bacia. Ao mesmo tempo que permite uma previsão de aumento de pressão de uso antrópico, devido a problemática da escassez hídrica existente na região.

O clima local é do tipo BSh (ALVARES *et al.*, 2014), caracterizado por ser quente e seco, típico do semiárido, apresentando irregularidade de precipitações e altas taxas de evaporação. A precipitação média anual varia de 550 mm a 780 mm, ocorrendo recorrentes períodos de escassez hídrica, que afetam o volume de água acumulado no reservatório (ANA, 2016). O bioma local é formado pela caatinga, com predominância de espécies da savana-estépica arborizada (IBGE, 2004; MMA, 2007).

A geomorfologia da região é formada predominantemente pela Depressão Sertaneja, caracterizada pela topografia plana a levemente ondulada, ocorrendo também o Planalto da Borborema, que apresenta maior elevação e desnivelamentos topográficos em seus limites (ANGELIM *et al.*, 2006; DINIZ; OLIVEIRA, 2015). Os principais tipos de solos existentes na região são os Neossolos Litólicos, caracterizados por serem solos jovens, pouco evoluídos, de alta fertilidade potencial e alta saturação por bases. Ocorrem também Luvisolos Crômicos, que são geralmente pouco profundos, com sequência de horizontes A, Bt e C, e nítida diferenciação entre os horizontes A e Bt, e variam de bem a imperfeitamente drenados. Também estão presentes os Planossolos Nátricos, solos com horizonte adensado e permeabilidade lenta ou muito lenta (EMBRAPA, 1971; SANTOS *et al.*, 2011; EMBRAPA, 2013).

2.2 Classificação supervisionada do uso e ocupação do solo da zona ripária

A identificação das principais classes de uso e ocupação existentes na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves, sua distribuição espacial e percentual de áreas ocupadas foi obtido a partir da classificação supervisionada de imagens do satélite *Landsat* 8, sensor OLI-TIRS, com resolução espacial multiespectral de 30 m, disponibilizadas no site *Earth Explorer* do *United States Geological Survey* (USGS), capturadas em julho de 2018. O processo de classificação foi realizado utilizando-se o complemento *Semi-Automatic Classification Plugin*, no *software* QGIS. As cores do mapa foram padronizadas de acordo com os critérios do Manual Técnico do Uso da Terra (IBGE, 2013).

2.3 Coleta do solo na zona ripária

Previamente à realização da coleta de solo, foi feita a análise de imagens de satélite no *Google Earth* e consulta ao Mapa de Solos da Embrapa, para identificação das principais classes de uso e ocupação e tipos de solos existentes na área de estudo.

A zona ripária do reservatório corresponde à Área de Preservação Permanente definida pelas Leis Nº 12.651/2012 (BRASIL, 2012b) e Nº 12.727/2012 (BRASIL, 2012a), adotada como uma faixa de 100 metros no entorno do manancial, por se tratar de um reservatório d'água artificial destinado ao abastecimento público.

Cada classe de uso e ocupação identificada em campo (Apêndice 1 a 5) correspondeu a um ponto de coleta (Tabela 10), no qual foram retiradas três repetições de amostras compostas deformadas na profundidade de 0 a 20 cm, constituídas pela mistura de cinco amostras simples, coletadas em caminho aleatório ou em zig-zag, de forma que fossem representativas da área. Essas amostras foram armazenadas em sacos plásticos etiquetados e mantidas em temperatura ambiente. Em laboratório, as amostras foram secas em estufa, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm de abertura, obtendo-se a terra fina seca em estufa (TFSE) (TEIXEIRA et al., 2017), para a posterior realização das análises laboratoriais.

Tabela 10 – Coordenadas dos pontos de coleta de amostras de solo na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Ponto de coleta	Descrição	Latitude	Longitude
PEC (Pecuária)	Área com presença de animais pastejando	9372482.00 m S	734798.00 m E
URB (Urbano)	Áreas urbanas com construções residenciais	9372206.00 m S	735579.00 m E
GRA (Gramínea)	Plantações de gramíneas (capim-elefante)	9363451.00 m S	743232.00 m E
TER (Terreno preparado)	Terrenos preparados para plantio	9363486.00 m S	743249.00 m E
CAA (Caatinga)	Vegetação nativa	9362082.00 m S	741841.00 m E

2.4 Análises físicas e químicas do solo

Foram analisados os seguintes atributos físicos, de acordo com os métodos preconizados por Teixeira *et al.*, (2017): granulometria (método da pipeta), classificação

textural (Diagrama Triangular simplificado), densidade do solo (Ds) (método da proveta), densidade de partículas (Dp) (método do balão volumétrico) e porosidade total (PT) (relação entre a densidade do solo e de partículas: $Pt = [1 - (Ds/Dp)] \times 100$).

Os atributos químicos analisados seguiram os métodos preconizados por (TEIXEIRA *et. al.*, 2017): pH em água (1:2,5), condutividade elétrica (CE) em água (1:1), carbono orgânico total (COT) (método de Walkley-Black modificado), teor de matéria orgânica (produto do valor de carbono orgânico por 1,724, admitindo que o húmus tem em sua composição aproximadamente 58% de carbono, $MO = COT \times 1,724$), K^+ e Na^+ trocáveis (fotometria de emissão de chama após extração com extrator Mehlich⁻¹), Ca^{2+} , Mg^{2+} trocáveis (titulação após extração com solução de KCl 1 mol L⁻¹), acidez trocável (titulação após extração com solução de KCl 1 mol L⁻¹), acidez potencial ($H^+ + Al^{3+}$) (titulação após extração com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹), fósforo (P) disponível (colorimetria após extração com extrator Mehlich-1) e nitrogênio (N) total (digestão sulfúrica e destilação Kjeldahl). A partir dos resultados obtidos do complexo sortivo foram calculados: soma de bases (SB), capacidade de troca de cátions potencial (CTCp), saturação por bases (V%) e saturação por sódio (PST).

2.5 Análise estatística

Para quantificar a alteração dos atributos físicos e químicos do solo os dados foram submetidos à análise exploratória de estatística descritiva. A análise de correlação linear de Pearson foi realizada com o objetivo de identificar o grau de correlação entre os atributos do solo. Tais análises foram realizadas no *software SAS (Statistical Analysis System, versão 8)*.

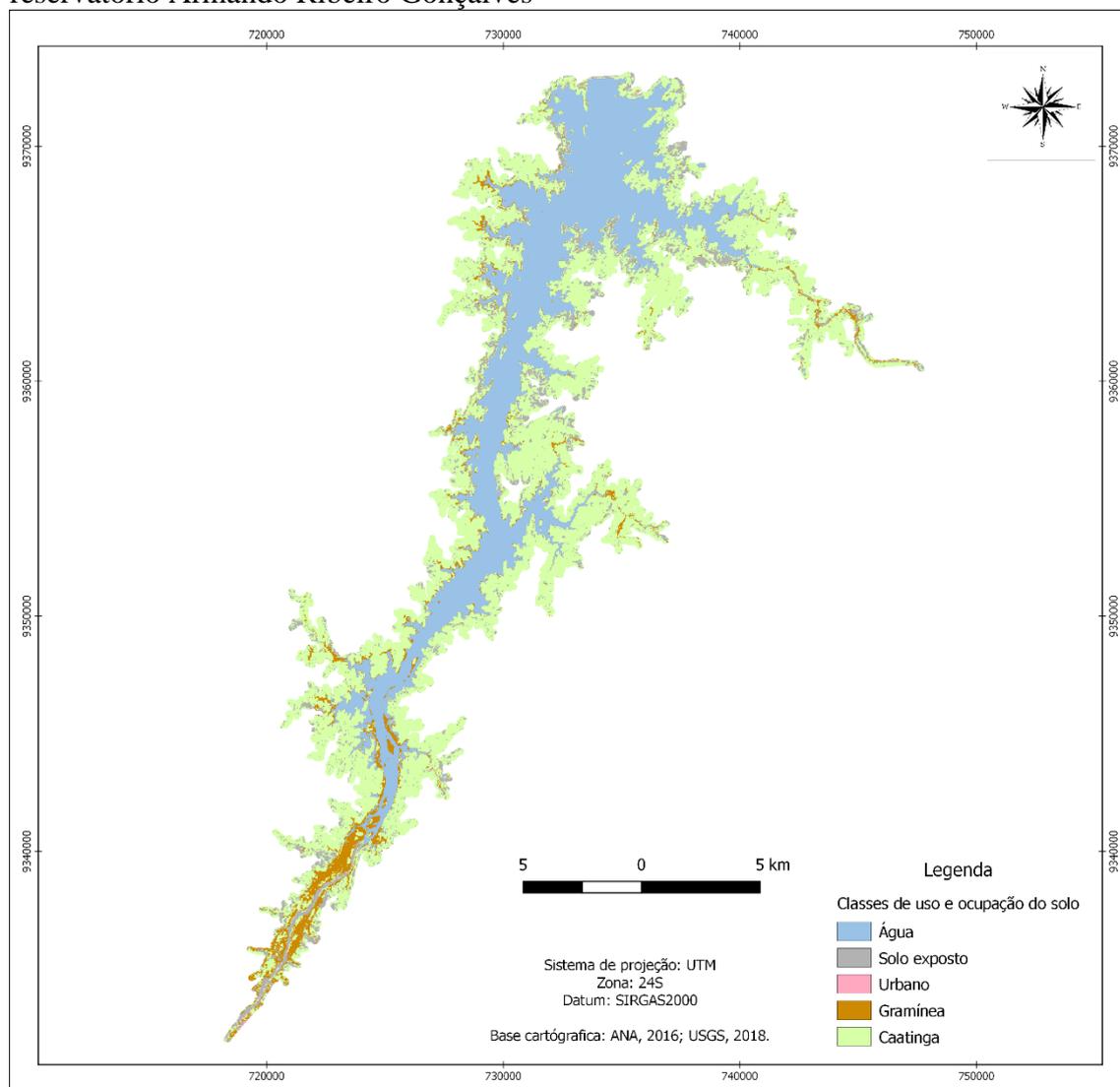
Também foi realizada uma Análise de Componentes Principais (ACP) no *software PC-ORD® v.6* a fim de reduzir a dimensão dos dados, facilitando a análise da variabilidade desses dados e a identificação da existência de relações entre as alterações provocadas no solo e as classes de uso e ocupação identificadas em campo.

3 RESULTADOS

3.1 Uso e ocupação do solo da zona ripária

A classificação supervisionada do uso e ocupação do solo possibilitou a identificação das seguintes classes de usos na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves: água, solo exposto, urbanização, gramínea e caatinga (Figura 15).

Figura 15 – Classificação supervisionada do uso e ocupação do solo da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves



A maior parte da área é ocupada por Caatinga, seguido da área de solo exposto (Tabela 11).

Tabela 11 – Áreas das classes de uso e ocupação identificadas na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves

Uso	Área (km ²)	Área (%)
Caatinga	109,22	71,33
Solo exposto	22,83	14,91
Gramínea	20,80	13,58
Urbano	0,28	0,18

3.2 Atributos físicos e químicos do solo da zona ripária

Os atributos analisados apresentaram diferenças entre os usos antrópicos e a área de referência de qualidade, a caatinga. Os solos das áreas estudadas, com exceção do TER, apresentaram predominância da fração granulométrica areia, chegando ao valor máximo de 93,14% na GRA, contudo a maior média obtida foi no uso URB (90,93%) (Tabela 12). Os valores mínimos de areia foram obtidos na área do TER, onde foi observado o maior desvio padrão dos dados para essa fração (Tabela 12). A granulometria do TER se mostrou divergente da área de caatinga e também dos demais usos antrópicos. As correlações obtidas entre os atributos analisados estão apresentadas no Apêndice 7. Os teores de areia ficaram negativamente correlacionados com o silte ($r=-0,98$; $p<0,0001$) e com a argila ($r=-0,90$; $p<0,0001$), o que indica que a areia se acumula após as perdas erosivas de silte e argila.

Tabela 12 – Estatística descritiva (média±desvio padrão, mínimo - máximo) dos atributos físicos do solo sob diferentes classes de uso e ocupação na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves. Classes: PEC = Pecuária; URB = Urbano; GRA = Gramínea; TER = Terreno preparado; CAA = Caatinga. Atributos: Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; PT = porosidade total.

Classes	Ds ----- g.cm ⁻³ -----	Dp -----	PT -----	Areia ----- % -----	Silte -----	Argila -----	Classe textural
CAA	1,46±0,03 (1,44-1,50)	2,75±0,06 (2,70-2,82)	46,87±0,53 (46,50-47,48)	81,15±1,91 (78,95-82,44)	10,49±2,04 (9,24-12,84)	8,36±0,18 (8,21-8,56)	Areia franca
GRA	1,42±0,12 (1,33-1,55)	2,81±0,01 (2,81-2,82)	49,54±4,02 (45,00-52,64)	86,82±5,75 (81,91-93,14)	4,54±3,67 (0,36-7,23)	8,64±2,18 (6,50-10,86)	Areia franca
TER	1,15±0,01 (1,14-1,16)	2,57±0,02 (2,55-2,58)	55,18±0,52 (54,66-55,69)	31,67±18,60 (13,88-50,99)	41,08±18,81 (24,45-61,49)	27,25±4,60 (24,56-32,56)	Franca
URB	1,53±0,04 (1,49-1,56)	2,87±0,10 (2,81-2,98)	46,61±1,33 (45,12-47,67)	90,93±1,78 (88,89-92,17)	2,45±0,84 (1,60-3,28)	6,62±1,24 (5,36-7,83)	Areia
PEC	1,53±0,03 (1,50-1,56)	2,88±0,09 (2,82-2,98)	47,10±0,49 (46,79-47,67)	76,07±4,63 (70,73-79,00)	7,93±1,94 (6,01-9,88)	16,01± 3,17 (13,11-19,39)	Franco-arenoso

O solo da CAA foi classificado como areia franca e a GRA foi a única classe antrópica que não modificou a textura do solo em relação à área de referência de qualidade (Tabela 12). O URB foi classificado como areia, em decorrência da maior fração de areia e dos valores mínimos de argila e silte, em comparação às demais classes (Tabela 12). A pecuária apresentou quase o dobro do teor médio de argila da CAA, classificando-a como franco-arenosa (Tabela 12). E o solo do TER, em virtude dos maiores teores de silte e argila, apresentou textura franca (Tabela 12).

Com relação à densidade do solo, os valores máximos foram encontrados nas áreas de PEC e URB e o mínimo no TER (Tabela 12). A densidade de partículas apresentou comportamento semelhante, com valor máximo em PEC e URB e valor mínimo no TER (Tabela 12), estando a densidade do solo e a densidade de partículas positivamente correlacionadas ($r=0,88$; $p<0,0001$). Esses valores mostraram-se condizentes com as respectivas classes texturais, pois apresentaram correlação altamente significativa positiva com a areia e correlação negativa e altamente significativa com argila e silte.

Com relação à porosidade, a GRA apresentou o menor valor mínimo e o maior desvio-padrão. No entanto, o URB obteve o menor valor médio e o TER apresentou a maior média de porosidade. A porosidade total esteve negativamente correlacionada com a densidade do solo ($r=-0,95$; $p<0,0001$) e com a densidade de partículas ($r=-0,69$; $p<0,0042$).

Os atributos químicos também variaram com o uso antrópico (Tabela 13). TER apresentou um pH médio inferior ao da CAA. O uso URB foi o que promoveu maiores modificações no pH, chegando ao valor de 8,29 (Tabela 13). O pH apresentou correlação positiva com a densidade do solo ($r=0,65$; $p<0,0091$) e com a densidade de partículas ($r=0,71$; $p<0,0033$).

Tabela 13 – Estatística descritiva (média±desvio padrão; mínimo-máximo) dos atributos químicos do solo sob diferentes classes de uso e ocupação na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves. Classes: PEC = Pecuária; URB = Urbano; GRA = Gramínea; TER = Terreno preparado; CAA = Caatinga. Atributos: CE = Condutividade elétrica; P = Fósforo; CO = Carbono orgânico; MO = Matéria orgânica; N = Nitrogênio; SB = Soma de bases; CTC_{pot} = Capacidade de troca de cátions potencial; V = Saturação por bases; PST = Saturação por sódio.

Classes	pH	CE mS.cm ⁻¹	H ⁺ +Al ³⁺ -----	Ca ²⁺	Mg ²⁺ -----	Na ⁺	K ⁺	SB	CTC pot -----	V -----%	PST -----	MO g.kg ⁻¹	P mg.dm ⁻³	N g.kg ⁻¹
CAA	6,42±0,23 (6,16-6,61)	112,67±32,65 (75,00-133,00)	1,57±0,31 (1,22-1,79)	3,07±1,11 (2,35-4,35)	0,97±0,48 (0,60-1,52)	0,11±0,04 (0,08-0,15)	0,29±0,08 (0,20-0,36)	4,44±1,70 (3,23-6,38)	6,01±1,93 (4,45-8,17)	73,05±4,83 (68,48-78,10)	1,79±0,06 (1,76-1,86)	15,77±5,93 (10,51-22,19)	2,83±0,53 (2,24-3,27)	0,95±0,77 (0,28-1,79)
GRA	6,73±0,61 (6,03-7,15)	202,33±71,82 (149,00-284,00)	0,73±0,77 (1,54-0,00)	4,29±0,72 (3,50-4,90)	1,86±0,49 (1,30-2,17)	0,18±0,07 (0,11-0,25)	0,09±0,04 (0,06-0,14)	6,43±1,24 (5,05-7,46)	7,16±1,99 (5,05-9,00)	91,38±8,56 (82,89-100,00)	2,69±1,14 (1,52-3,79)	3,25±2,47 (1,83-6,10)	42,02±18,15 (22,28-57,99)	0,52±0,28 (0,34-0,84)
TER	6,39±0,58 (5,96-7,05)	426,00±83,50 (343,00-510,00)	1,90±1,69 (0,00-3,25)	12,79±4,60 (9,90-18,10)	5,45±1,06 (4,56-6,62)	0,20±0,09 (0,10-0,28)	0,71±0,67 (0,19-1,47)	19,15±6,33 (15,22-26,46)	21,05±4,69 (18,22-26,46)	89,67±9,19 (82,40-100,00)	0,96±0,36 (0,56-1,26)	22,99±8,89 (15,87-32,96)	7,66±1,06 (6,71-8,80)	1,92±0,71 (1,51-2,74)
URB	7,82±0,57 (7,19-8,29)	481,00±262,82 (231,00-755,00)	0,00±0,00 (0,00-0,00)	5,35±0,89 (4,45-6,22)	2,28±1,03 (1,65-3,47)	0,54±0,19 (0,33-0,70)	0,13±0,07 (0,07-0,20)	8,30±1,93 (6,90-10,50)	8,30±1,93 (6,90-10,50)	100,00±0,00 (100,00-100,00)	6,55±2,14 (4,35-8,63)	5,49±3,40 (2,44-9,16)	122,31±25,84 (92,53-138,82)	0,54±0,21 (0,39-0,78)
PEC	7,53±0,55 (6,95-8,05)	308,00±86,75 (233,00-403,00)	0,33±0,57 (0,00-0,98)	8,49±1,07 (7,60-9,67)	3,55±0,33 (3,22-3,87)	0,28±0,18 (0,15-0,48)	0,21±0,10 (0,14-0,32)	12,53±0,96 (11,72-13,59)	12,85±1,00 (11,72-13,59)	97,54±4,27 (92,61-100,00)	2,13±1,29 (1,30-3,61)	5,29±2,47 (3,05-7,94)	45,30±18,86 (24,17-60,43)	0,52±0,06 (0,45-0,56)

A condutividade elétrica foi condizente com os usos existentes em cada ambiente. Na CAA observou-se os menores valores de média, desvio-padrão e mínimo, enquanto o oposto foi encontrado na classe de uso URB (Tabela 13).

A acidez potencial variou em função do pH do solo, apresentando correlação negativa ($r=-0,85$; $p<0,0001$), sendo o TER a área com os maiores valores e o URB apresentou valores nulos para este atributo (Tabela 13).

Com relação aos cátions trocáveis, observou-se um predomínio de Ca^{2+} e Mg^{2+} em todas as classes de uso e ocupação do solo (Tabela 13), estando esses positivamente correlacionados entre si ($r=0,95$; $p<0,0001$). Foram observadas correlações positivas altamente significativas do Ca^{2+} e Mg^{2+} com teores de silte e argila e negativa com a areia. A área de TER apresentou os maiores valores de média, desvio e máximo para esses dois cátions (Tabela 13). Contudo, a área de PEC também apresentou altos incrementos de Ca^{2+} e Mg^{2+} em relação à CAA.

Diferentemente dos outros cátions, cujos os menores teores eram obtidos na área de referência de qualidade, o menor teor de K^+ foi obtido na GRA. Os maiores valores foram observados no TER (Tabela 13), logo houve correlação positiva entre K^+ e argila ($r=0,74$; $p<0,0015$). K^+ esteve positivamente correlacionado também com Ca^{2+} ($r=0,77$; $p<0,0007$) e com Mg^{2+} ($r=0,66$; $p<0,0077$).

Com relação a Na^+ , os menores valores de média, desvio-padrão e mínimo foram encontrados na CAA, enquanto o oposto ocorreu no URB. Tais resultados corroboram com a correlação positiva obtida entre Na^+ e a condutividade elétrica ($r=0,81$; $p<0,0003$).

Os usos antrópicos promoveram um aumento de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ em comparação ao solo da caatinga. Em consequência, a soma de bases e a capacidade de troca de cátions potencial também foi maior nas classes antrópicas, apresentando os maiores valores na área de TER e os menores na CAA. A soma de bases e a CTC potencial apresentaram correlação altamente significativa positiva com argila, silte e porosidade, e consequentemente, correlação altamente significativa negativa com areia e densidade do solo. Além de apresentarem correlação entre si ($r=0,98$; $p<0,0001$), a soma de bases e a CTC potencial também apresentaram correlação altamente significativa com Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ .

A saturação por bases apresentou valores superiores a 50% em todas as classes, classificando esses solos como eutróficos (Tabela 13). No entanto, observa-se que os usos antrópicos aumentaram essa eutrofia, sendo as áreas URB e PEC as mais impactantes para esse atributo.

O uso URB apresentou um caráter solódico, em razão da PST ser superior a 6%, evidenciando o risco de sodicidade nessa classe.

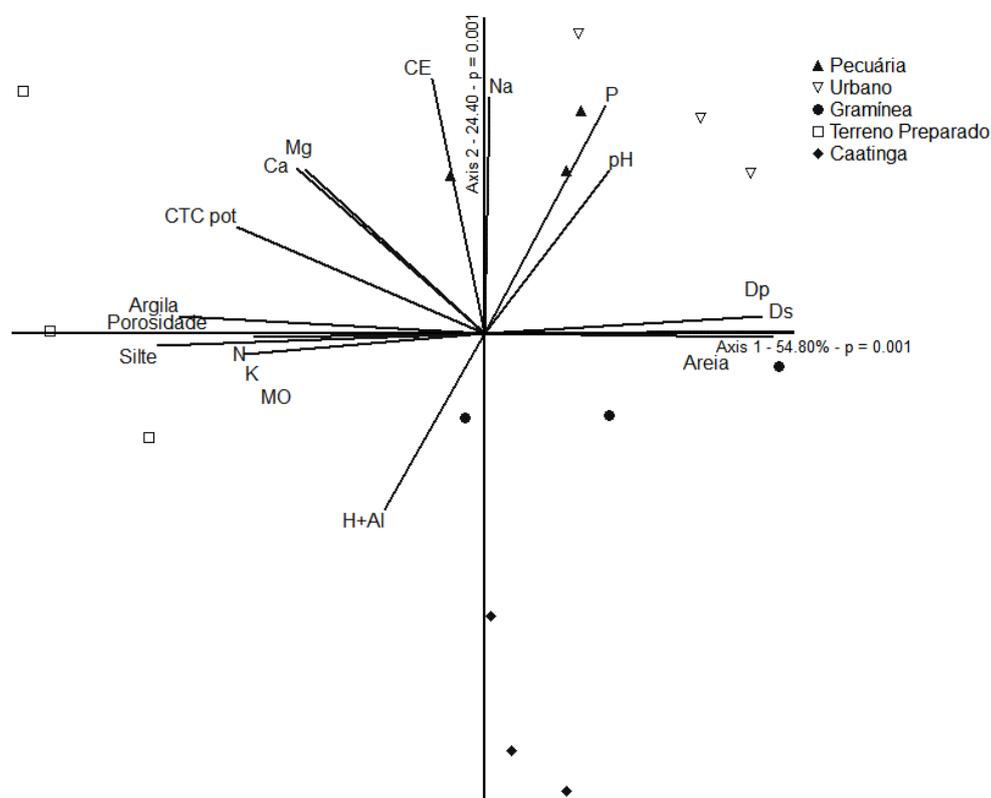
Com relação ao teor de matéria orgânica, os menores valores foram obtidos para a classe GRA e os maiores valores ocorreram na área do TER (Tabela 13). A matéria orgânica esteve positivamente correlacionada com as frações finas do solo e negativamente com a areia, a densidade do solo e a densidade de partículas, apresentando também correlação positiva com o K^+ ($r=0,85$; $p<0,0001$). A correlação negativa com a areia pode indicar que a matéria orgânica é perdida por erosão assim como argila e silte.

O fósforo apresentou menores teores na área de referência de qualidade e aumento nos demais usos, com valores máximos observados no URB, chegando a uma diferença média de aproximadamente 120 mg.dm^{-3} para essas duas classes. Dessa forma, foi observada correlação positiva desse nutriente com o pH ($r=0,73$; $p<0,002$) e com a saturação por sódio ($r=0,86$; $p<0,0001$).

Para o nitrogênio, as classes de PEC, URB e GRA apresentaram médias mínimas semelhantes. Os maiores valores foram obtidos no TER. Houve correlação positiva e altamente significativa do N com as frações finas do solo e correlação negativa altamente significativa com a areia, a densidade do solo e a densidade de partículas. Destaca-se também a correlação com a CTC potencial ($r=0,68$; $p<0,005$) e com a matéria orgânica ($r=0,74$; $p<0,0018$). Não foi obtida correlação significativa entre Nitrogênio e Fósforo.

A Análise de Componentes Principais (ACP) explicou 79,2 % da variabilidade dos dados nos dois primeiros eixos (eixo 1=54,80%, $p=0,001$ e eixo 2=24,40%, $p=0,001$) (Figura 16). Os atributos mais importantes na ordenação do eixo 1 foram: Ds ($r=0,928$), Dp ($r=0,857$), PT ($r=-0,856$), areia ($r=0,873$), argila ($r=-0,899$), silte ($r=-0,931$), MO ($r=-0,798$), N ($r=-0,781$), Ca^{2+} ($r=-0,689$), Mg^{2+} ($r=-0,706$), K^+ ($r=-0,780$) e CTC pot ($r=-0,809$). Para o eixo 2 estiveram mais correlacionados: pH ($r=0,655$), CE ($r=0,820$), P ($r=0,776$), $H^+ + Al^{3+}$ ($r=-0,682$) e Na^+ ($r=0,789$).

Figura 16 – Análise de componentes principais dos atributos físicos e químicos do solo sob diferentes classes de uso e ocupação na zona ripária do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves



O solo de CAA apresentou distanciamento das demais classes de uso e ocupação e das variáveis analisadas, estando relacionado com o lado negativo do eixo 2. A área GRA ficou mais correlacionada com o eixo 1 positivo e com a fração areia, densidade do solo e densidade de partículas. A área com terreno preparado apresentou-se do lado negativo do eixo 1, estando relacionada a teores de silte e argila, porosidade total, nitrogênio, potássio e matéria orgânica. A pecuária ficou relacionada ao eixo 2 positivo, estando próxima à condutividade elétrica, sódio, fósforo e pH. O solo URB apresentou-se próximo à PEC, ficando relacionado com o fósforo e o pH.

A ACP mostrou a homogeneidade entre os pontos amostrais das classes de uso e ocupação do solo. Vale ressaltar que todos os atributos físicos foram ordenados no eixo 1 e esse mesmo eixo segregou a CAA dos usos URB e PEC.

4 DISCUSSÃO

A resposta dos atributos físicos e químicos do solo foi dependente da classe de uso e ocupação. A área TER e GRA parecem se distanciar mais da CAA por alterações físicas do solo enquanto a PEC e URB por alterações químicas. A zona ripária é um importante ecossistema com funções hidrológicas e ecológicas capazes de contribuir para manter a resiliência da microbacia (HALE *et al.*, 2014; GONZÁLEZ *et al.*, 2017). Apesar de quase metade do território mapeado apresentar ocupação por caatinga, foi verificado em campo que em algumas dessas áreas também ocorre exploração por pecuária extensiva. Prática que aumenta as áreas de solo exposto e representa um elevado potencial de degradação em razão da fragilidade natural dos solos da região. Os demais usos antrópicos mapeados, urbanização e plantação de gramíneas, mesmo ocorrendo em menor proporção, também promovem a degradação do solo.

A predominância da fração areia nas classes de uso e ocupação amostradas, com exceção do TER é coerente com a ocorrência do Neossolo Litólico Eutrófico, caracterizado por ser um solo pouco desenvolvido, de alta fertilidade natural, com textura grosseira e baixa intensidade de atuação dos processos pedogenéticos (EMBRAPA, 2006), sendo considerado um solo naturalmente susceptível à erosão. Contudo, o aumento do teor de areia relacionado aos usos antrópicos indica perdas erosivas de argila, silte e matéria orgânica.

Diferentemente das outras classes, o TER apresentou uma predominância de silte e altos teores de argila, decorrentes, provavelmente, de contribuições sedimentares ao longo da bacia, pois essa área é parte da bacia hidráulica do reservatório, ou seja, é inundada em épocas de cheia. O alto desvio padrão dos dados analisados reforça essa hipótese, evidenciando a heterogeneidade da área.

A área de referência de qualidade apresentou um solo cuja classe textural foi classificada como areia franca. A GRA manteve a mesma textura, por apresentar um uso que não modifica muito as características físicas do solo em relação à CAA. O uso URB promoveu uma diminuição do teor de argila e silte, fazendo com que sua textura seja mais arenosa. Essa perda da fração leve do solo pode ser decorrente da erosão (SAMANI *et al.*, 2018). Na PEC, apesar de haver um alto teor de areia, existe quase o dobro de argila que é encontrado na CAA, fazendo com que o solo dessa classe apresente textura franco arenosa. Isso denota a forte influência da argila nas propriedades do solo, visto que, pequenas quantidades de argila são suficientes para modificar a classe textural dos solos. O solo do TER foi classificado como textura franca, que corresponde a uma textura média, enquanto as classes CAA, GRA e URB apresentam textura arenosa.

Com relação à densidade do solo, os menores valores foram encontrados nas áreas agrícolas (TER e GRA), semelhante ao encontrado no semiárido por Ferreira (2015). O valor máximo de densidade do solo ocorreu em PEC e URB, corroborando outros trabalhos (OLIVEIRA, 2012; MANCUSO *et al.*, 2014; CARVALHO *et al.*, 2015), indicando que a densidade do solo é geralmente maior em áreas de zonas ripárias degradadas (HALE *et al.*, 2014). Nas áreas de pecuária, o pisoteio do gado promove a compactação do solo, aumentando sua densidade, e na área urbana a compactação é provocada pelo acesso à movimentação de pedestres, veículos, entre outros, em áreas de solo exposto. Vale ressaltar que foi visualizado a presença de pecuária em áreas urbanas, visto que essa atividade ocorre tradicionalmente de forma extensiva no semiárido (PEREIRA; DANTAS NETO, 2014), o que aumenta a área de abrangência dos impactos.

A densidade de partículas e a porosidade apresentaram comportamento condizentes com a densidade do solo. A densidade de partículas geralmente é influenciada pela composição mineralógica e pelo conteúdo de matéria orgânica no solo (SCHJØNNING *et al.*, 2017), de fato, as variáveis densidade de partículas com teor matéria orgânica apresentaram correlação negativa altamente significativa. Como os solos da região são pouco desenvolvidos e predominantemente formados por minerais primários são esperados altos valores de densidade do solo.

A maior porosidade total encontrada no TER pode ser justificada pelo maior teor de argila e revolvimento mecânico do solo para o plantio, o que provoca a quebra dos agregados do solo e maior aeração, aumentando os espaços porosos (MAHARJAN *et al.*, 2018). Enquanto os menores valores médios de porosidade foram observados no URB devido ao intensivo uso de solo que promove a compactação e conseqüentemente a redução dos espaços porosos.

Alterações provocadas nos atributos físicos do solo refletem também em suas propriedades químicas, conforme as várias correlações altamente significativas obtidas entre variáveis físicas e químicas.

No TER, o acúmulo de matéria orgânica pode ser responsável pela diminuição do seu pH. A respiração biológica do solo e a absorção de cátions pelas plantas, são processos que contribuem para a diminuição do pH, nas áreas de CAA e GRA. Enquanto a remoção da vegetação e a baixa produção de matéria orgânica contribuem para a alcalinização do solo (ISLAM; WEIL, 2000; GEISSEN *et al.*, 2009; SAMANI *et al.*, 2018) nos usos URB e PEC, o que promove também o aumento da densidade do solo e da densidade de

partículas, fazendo com que quanto maior o pH, maior a densidade do solo e a densidade de partículas.

O elevado pH obtido no uso URB é resultado da grande concentração de sais nessa área, que é confirmada pela sua alta condutividade elétrica. Apesar de não ter sido a classe com a maior quantidade de cátions, o maior teor de Na^+ no uso URB pode ter influenciado altos valores de condutividade elétrica para essa classe. A condutividade elétrica é um indicador da salinização do solo (NABIOLLAHI *et al.*, 2017), um problema comum no semiárido brasileiro (VITAL *et al.*, 2015). Apesar dos solos analisados não apresentarem caráter sódico ($\text{PST} > 15\%$), houve um aumento significativo da condutividade elétrica nos usos antrópicos em relação à CAA (Tabela 13).

O solo do TER apresentou um aumento significativo do teor de todos os cátions analisados em comparação ao solo da CAA, apresentando valores superiores aos demais usos, com exceção do Na^+ , resultando na maior soma de bases e no maior valor de CTC. Tal comportamento pode ser decorrente de queimadas, visto que em áreas circunvizinhas foram observadas a presença de queima da vegetação (Apêndice 6). Essa queima aumenta a disponibilidade de nutrientes devido à mineralização da fitomassa ocasionada pelo fogo (FUENTES-RAMIREZ *et al.*, 2015). Tal prática, a curto prazo, aumenta a disponibilidade de nutrientes na camada superficial do solo, apesar de destruir a biota do solo, porém, com o passar do tempo, ocorre o empobrecimento do solo devido às perdas do excesso de nutrientes, pois o solo fica mais susceptível à erosão (FUENTES-RAMIREZ *et al.*, 2015; LIMA *et al.*, 2017).

Os cátions Ca^{2+} , Mg^{2+} e Na^+ são os principais constituintes, respectivamente, do complexo sortivo dos solos da região, refletindo a natureza do material de origem, típico de áreas de baixa pluviosidade (BARROS; CHAVES, 2014). Os usos antrópicos promoveram o aumento desses cátions, em relação à área de referência de qualidade, corroborando Aquino *et al.* (2014) e Carneiro *et al.* (2013). O Al^{3+} não foi detectado nas amostras analisadas.

O cálcio é um nutriente essencial para as plantas. No entanto, seu aumento nas classes antrópicas pode ser resultado da remoção das camadas superficiais do solo pela erosão, expondo a camada subsuperficial, mais rica em Ca (MARTINS *et al.*, 2010). Vale salientar que na área de PEC foi observada a presença de carapaças de macroinvertebrados aquáticos, material rico em cálcio, pois o solo foi coletado em período de seca na região onde o solo se forma a partir da exposição do sedimento no interior da bacia hidráulica do reservatório.

Os usos antrópicos, com exceção do TER, promoveram uma diminuição do teor de K^+ nos solos em comparação ao encontrado na área de CAA. O K^+ ajuda as plantas a se adaptarem a estresses ambientais. A diminuição da cobertura vegetal e substituição da vegetação nativa por agricultura são responsáveis pela diminuição de K^+ nos solos (VAGEN; ANDRIANOROFANOMEZANA; ANDRIANOROFANOMEZANA, 2006; SAMANI *et al.*, 2018), corroborando a correlação positiva obtida entre K^+ e MO, podendo também haver perdas por lixiviação, erosão, fixação e remoção pelas plantas.

A matéria orgânica é um atributo dinâmico no tempo e no espaço, sendo influenciada pelas ações antrópicas que promovem mudanças no uso e ocupação do solo (ABUDUWAILI *et al.*, 2012; ARAÚJO *et al.*, 2018). Vários estudos relatam a redução da matéria orgânica quando há a substituição da vegetação nativa (ABERA; BELACHEW; DEBRE, 2011; CARNEIRO *et al.*, 2013; PROKOP; PŁOSKONKA, 2014; ARAÚJO *et al.*, 2018; QIAN *et al.*, 2018; SAMANI *et al.*, 2018). No caso em estudo, foi observado um maior teor de matéria orgânica na classe TER, em virtude do manejo adotado, provavelmente com adição de restos culturais, e a sua origem sedimentar. Contudo, nas demais classes antrópicas ocorreu uma diminuição significativa desse teor, o que pode ser indício da ocorrência de erosão nesses solos, em razão da matéria orgânica apresentar-se como a fração leve do solo, podendo ser facilmente perdida. Ademais, sua redução promove a diminuição dos agregados do solo, intensificando ainda mais a susceptibilidade à erosão (QIAN *et al.*, 2018; SAMANI *et al.*, 2018) e à degradação do solo (KARLEN; RICE, 2015).

Com relação ao teor de fósforo, todos os usos antrópicos promoveram o aumento do teor desse nutriente. No TER os teores não foram tão distantes da média obtida na CAA, um aumento decorrente da mineralização da matéria orgânica. Na GRA, o aumento pode ser explicado pela localização do ponto de coleta dessa classe, pois a plantação ocorre na bacia hidráulica do reservatório, que se constitui de um sedimento rico em nutrientes, especialmente fósforo (GIRMAY *et al.*, 2009). Na PEC, as excretas dos animais adicionam nutrientes como fósforo e nitrogênio ao solo (MORAES *et al.*, 2013). E no URB, além da influência da PEC, os altos teores de P podem ser resultado do aporte de nutrientes por esgotos domésticos (XU; ZHANG, 2016), visto que não há rede de coleta de esgotos e a maioria das residências descarta suas águas cinzas diretamente no solo. Nos solos do semiárido, os baixos teores de óxidos de Fe e Al dificultam a formação de complexos com íons fosfato, diminuindo a capacidade de adsorção de P no solo, o que promove o aumento da disponibilidade de P na solução do solo, facilitando seu transporte

até os corpos hídricos (EKHOLM; LEHTORANTA, 2012; BAKEN *et al.*, 2015). O estudo realizado para a elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó-Piranhas-Açú estimou que as concentrações de fósforo na bacia do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves são originadas proporcionalmente pelas seguintes fontes: 10,5% esgoto, 66,2% agricultura, 23,1% solo natural e 0,2% pecuária (ANA, 2016).

O nitrogênio do solo está relacionado ao teor de matéria orgânica, por isso sua quantidade foi maior na área de TER, seguido pela CAA. Os demais usos antrópicos promoveram a redução do nitrogênio, corroborando estudos que identificaram a redução do nitrogênio com a substituição da vegetação nativa (WEI *et al.*, 2014; SAMANI *et al.*, 2018).

A classe PEC merece destaque em razão do seu caráter extensivo e dos impactos causados, sendo uma das principais atividades desenvolvidas em regiões semiáridas (COELHO *et al.*, 2014). Além da alteração nos atributos físicos do solo, provocada pelo pisoteio dos animais, a disponibilização de nutrientes via excretas, aliada à diminuição da infiltração de água e aumentando o escoamento superficial, pode acarretar em perdas de solo e nutrientes que acabam chegando aos corpos hídricos, intensificando processos de eutrofização (TRIMBLE; MENDEL, 1995; OLIVEIRA, 2012; PEREIRA; DANTAS NETO, 2014; FERREIRA, 2015; MEDEIROS, 2016). De fato, a média do índice de estado trófico da água do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves apresentou-se como mesotrófico no período entre 2011 a 2016, chegando a ser eutrófico em alguns períodos (PROGRAMA ÁGUA AZUL, 2017).

A análise de componentes principais demonstrou que a modificação dos atributos do solo promovida pelos usos antrópicos, sobretudo o enriquecimento por sais e nutrientes, fizeram com que a CAA apresentasse um distanciamento das variáveis e dos usos analisados. Sendo a GRA, dentre as classes antrópicas, o uso que menos modifica as propriedades do solo, com relação à área de referência de qualidade. Enquanto o TER, além de apresentar modificação dos atributos físicos, pelo aumento das frações finas do solo, também apresenta alteração química devido ao aumento do teor de cátions pela mineralização da matéria orgânica, por isso apresenta-se isolado dos demais usos. A aragem do terreno promove a desagregação do solo, deixando o solo exposto e enriquecido, susceptível à erosão. No entanto, os usos mais degradantes são a PEC, seguida do uso URB, pois estão mais relacionados com pH, P e CE, indicando o enriquecimento excessivo por fósforo, alcalinização e risco de salinização.

Com isso, percebe-se que atividades agrícolas realizadas no semiárido tropical do Brasil, representadas nesse estudo pelos usos GRA e TER, promovem principalmente a modificação dos atributos físicos do solo, sendo um problema mais simples de ser revertido. Porém, caso haja um manejo dessas atividades com queima ou adubação artificial, ocorre também a modificação dos atributos químicos do solo. Contudo, pecuária e urbanização indicam um estágio superior de degradação, pois modificam os atributos químicos do solo, sendo mais complexo seu retorno ao estado inicial de qualidade ambiental do solo.

Os efeitos do uso e ocupação do solo identificados nessa zona ripária corroboram outros estudos realizados no semiárido brasileiro, que também indicaram que a maior contribuição para a ocorrência de degradação ambiental advém da ocupação antrópica (MARTINS *et al.*, 2010; OLIVEIRA, 2012; PEREIRA; DANTAS NETO, 2014; FERREIRA, 2015; MEDEIROS, 2016; ARCOVERDE; CORTEZ; PEREIRA, 2018).

5 CONCLUSÃO

A resposta dos atributos físicos e químicos do solo é dependente da classe de uso e ocupação.

Na zona ripária, as atividades agrícolas são mais responsáveis pela degradação física do solo, enquanto a pecuária e urbanização pela degradação química do solo.

Os principais processos de degradação ambiental instalados nessa zona ripária são erosão e enriquecimento do solo por nutrientes.

REFERÊNCIAS

- ABERA, Y.; BELACHEW, T.; DEBRE. Effects of landuse on soil organic carbon and nitrogen in soils of Bale, Southeastern Ethiopia. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 14, n. November 2010, p. 229–235, 2011.
- ABUDUWAILI, J. *et al.* Spatial distribution of soil moisture, salinity and organic matter in Manas River watershed, Xinjiang, China. **Journal of Arid Land**, v. 4, n. 4, p. 441–449, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu**. Brasília: Agência Nacional de Águas, 2016.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2014.
- ANGELIM, L. A. de A. *et al.* **Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: CPRM, 2006.
- AQUINO, R. E. de *et al.* Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 32–41, 2014.
- ARAÚJO, D. C. dos S. *et al.* Spatial variability of soil attributes in an experimental basin in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 38–44, 2018.
- ARCOVERDE, S. N. S.; CORTEZ, J. W.; PEREIRA, J. DE S. Atributos físicos de solos em áreas sob diferentes usos no semiárido baiano. **Holos**, v. 4, n. 34, p. 65–77, 2018.
- BAKEN, S. *et al.* Phosphorus losses from agricultural land to natural waters are reduced by immobilization in iron-rich sediments of drainage ditches. **Water Research**, v. 71, p. 160–170, 2015.
- BARBOSA, J. E. de L. *et al.* Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 24, n. 1, p. 103–118, 2012.
- BARROS, J. D. S.; CHAVES, L. H. G. Changes in soil chemical properties under different farming systems exploration in semiarid region of Paraíba. **African Journal of Agricultural Research**, v. 9, n. 31, p. 2436–2442, 2014.
- BOTERO-ACOSTA, A. *et al.* Riparian vulnerability model based on environmental features. **Journal of Environmental Management**, v. 203, p. 592–602, 2017.
- BRASIL. **Lei nº 12651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67,

de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília: Presidência da República, 2012b.

BRASIL. **Lei nº 12727, de 17 de outubro de 2012**. Altera a Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; e revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001, o item 22 do inciso II do art. 167 da Lei no 6.015, de 31 de dezembro de 1973, e o § 2o do art. 4o da Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012. Brasília: Presidência da República, 2012a.

BÜNEMANN, E. K. *et al.* Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, n. September 2017, p. 105–125, 2018.

CAMMERAAT, E. L. H.; CERDÀ, A.; IMESON, A. C. Ecohydrological adaptation of soils following land abandonment in a semi-arid environment. **Ecohydrology**, n. 3, p. 421–430, 2010.

CANTÓN, Y. *et al.* A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain. **Journal of Arid Environments**, v. 75, n. 12, p. 1254–1261, 2011.

CARNEIRO, M. A. C. *et al.* Atributos indicadores de qualidade em solos de cerrado no entorno do Parque Nacional das Emas, Goiás. **Biosci. J.**, v. 29, n. 6, p. 1857–1868, 2013.

CARVALHO, R. P. de *et al.* Atributos físicos e químicos de um neossolo quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Caatinga**, v. 28, n. 1, p. 148–159, 2015.

COELHO, V. H. R. *et al.* Dinâmica do uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica do semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 64–72, 2014.

COSTA, C. W. *et al.* Surface runoff and accelerated erosion in a peri-urban wellhead area in southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 160, 2018.

DINIZ, M. T. M.; OLIVEIRA, G. P. de. Compartimentação e caracterização das unidades de paisagem do Seridó Potiguar. **Brazilian Geographical Journal**, v. 6, p. 291–318, 2015.

EKHOLM, P.; LEHTORANTA, J. Does control of soil erosion inhibit aquatic eutrophication? **Journal of Environmental Management**, v. 93, n. 1, p. 140–146, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3ª ed. Rio de Janeiro, 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Levantamento exploratório - Reconhecimento de solos do estado do Rio Grande do Norte**. Recife: Convênio de Mapeamento de Solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN, 1971.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 1. ed. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, 1999.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2006.

FERREIRA, R. S. **Qualidade da água de um reservatório e do solo da zona ripária sob diferentes usos na região semiárida do Rio Grande do Norte**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

FUENTES-RAMIREZ, A. *et al.* Spatio-temporal impacts of fire on soil nutrient availability in *Larrea tridentata* shrublands of the Mojave Desert, USA. **Geoderma**, v. 259–260, p. 126–133, 2015.

GEISSEN, V. *et al.* Geoderma Effects of land-use change on some properties of tropical soils — An example from Southeast Mexico. **Geoderma**, v. 151, p. 87–97, 2009.

GIRMAY, G. *et al.* Runoff and sediment-associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 376, n. 1–2, p. 70–80, 2009.

GONZÁLEZ, E. *et al.* Integrative conservation of riparian zones. **Biological Conservation**, v. 211, p. 20–29, 2017.

GUO, E. *et al.* Effects of riparian vegetation patterns on the distribution and potential loss of soil nutrients: a case study of the Wenyu River in Beijing. **Front Environ Sci Eng**, 2013.

HALE, R. *et al.* Scales that matter: guiding effective monitoring of soil properties in restored riparian zones. **Geoderma**, v. 228–229, p. 173–181, 2014.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2013. 171 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Mapa de vegetação do Brasil**. Escala 1:5.000.000. 3 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2004.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture Ecosystems & Environment**, v. 79, n. 1, p. 9–16, 2000.

KARLEN, D. L. *et al.* Soil Quality: A Concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America**, v. 61, p. 4–10, 1997.

KARLEN, D. L.; RICE, C. W. Soil degradation: Will humankind ever learn? **Sustainability**, v. 7, n. 9, p. 12490–12501, 2015.

- LIMA, J. W. C. *et al.* Custo da erosão hídrica para diferentes usos do solo no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, p. 1772–1783, 2017.
- MAHARJAN, G. R. *et al.* Approaches to model the impact of tillage implements on soil physical and nutrient properties in different agro-ecosystem models. *Soil and Tillage Research*, v. 180, n. March, p. 210–221, 2018.
- MANCUSO, M. A. *et al.* Características da taxa de infiltração e densidade do solo em distintos tipos de cobertura de solo em zona urbana. **Monografias Ambientais - REMOA**, v. 14, n. 1, p. 2890–2998, 2014.
- MARTINS, C. M. *et al.* Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 34, p. 1883–1890, 2010.
- MEDEIROS, C. E. B. F. DE S. **Os impactos do uso e ocupação e evento de seca extrema na qualidade da água e do solo de um manancial tropical semiárido.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2016.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Atlas de áreas susceptíveis a desertificação no Brasil.** Santana, M.O. (Org.). Brasília: MMA, 2007. 134 p.
- MIRANDA, K. R. **Influência do uso e ocupação de solo na qualidade da água de um reservatório mesotrófico na região semiárida tropical.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.
- MIRHOSSEINI, M. *et al.* Changing land use a threat to surface water quality: a vulnerability assessment approach in Zanjanroud Watershed , Central Iran 1. **Water Resources**, v. 45, n. 2, p. 268–279, 2018.
- MORAES, A. de *et al.* Integrated crop-livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4–9, 2013.
- MOURI, G. Assessment of land cover relocation incorporating the effects of human activity in typical urban and rural catchments for the design of management policies. **Environmental Science and Policy**, v. 50, p. 74–87, 2015.
- MOURI, G.; TAKIZAWA, S.; OKI, T. Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact. **Journal of Environmental Management**, v. 92, n. 7, p. 1837–1848, 2011.
- NABIOLLAHI, K. *et al.* Assessment of soil quality indices for salt-affected agricultural land in Kurdistan Province, Iran. **Ecological Indicators**, v. 83, n. July, p. 482–494, 2017.
- NGUYEN, H. H. *et al.* Modelling the impacts of altered management practices, land use and climate changes on the water quality of the Millbrook catchment-reservoir system in South Australia. **Journal of Environmental Management**, v. 202, p. 1–11, 2017.

- OLIVEIRA, H. A. de. **Análise do uso e ocupação do solo das margens de um reservatório e a sua influência na qualidade da água.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2013.
- OLIVEIRA, J. N. P. de. **A influência da poluição difusa e do regime hidrológico peculiar do semiárido na qualidade da água de um reservatório tropical.** Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- PEREIRA, R. A.; DANTAS NETO, J. Efeito das atividades agropastoris sobre os atributos físico-químicos de três classes de solos de uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro. **Bol. Goia. Geogr.**, v. 34, n. 1, p. 169–188, 2014.
- PROGRAMA ÁGUA AZUL. Rede compartilhada de monitoramento da qualidade da água: monitoramento da qualidade das águas superficiais no período de setembro a novembro de 2016. 5º relatório semestral. Natal, 2017.
- PROKOP, P.; PŁOSKONKA, D. Natural and human impact on the land use and soil properties of the Sikkim Himalayas piedmont in India. **Journal of Environmental Management**, v. 138, p. 15–23, 2014.
- QIAN, J. *et al.* Effects of riparian land use changes on soil aggregates and organic carbon. **Ecological Engineering**, v. 112, n. July 2017, p. 82–88, 2018.
- SAMANI, K. M. *et al.* Effect of land-use changes on chemical and physical properties of soil in western Iran (Zagros oak forests). **Journal of Forestry Research**, 2018.
- SANTOS, H. G. dos *et al.* O novo mapa de solos do Brasil: legenda atualizada. **Embrapa**, p. 67, 2011.
- SCHJØNNING, P., *et al.* Predicting soil particle density from clay and soil organic matter contents. **Geoderma**, v. 286, p. 83–87, 2017.
- TEIXEIRA, Paulo César *et al.* **Manual de Métodos de Análise de Solo.** 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017. 574 p.
- TRIMBLE, W. S.; MENDEL, C. A. The cow as a geomorphic agent – A critical review. **Geomorphology**, v. 13, p. 233-253, 1995.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Earth explorer.** 2018. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 11 fev. 2018.
- VAGEN, T.-G.; ANDRIANOROFANOMEZANA, M.-A. A.; ANDRIANOROFANOMEZANA, S. Deforestation and cultivation effects on characteristics of oxisols in the highlands of Madagascar. **Geoderma**, v. 131, p. 190–200, 2006.
- VITAL, A. de F. M. *et al.* Caracterização de um solo salinizado em área irrigada da região Semiárida. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 4, p. 28–32, 2015.

WANG, P. *et al.* Effects of urbanization, soil property and vegetation configuration on soil infiltration of urban forest in changchun, Northeast China. **Chinese Geographical Science**, v. 28, n. 3, p. 482–494, 2018.

WEI, X. *et al.* Agricultural and forest meteorology the dynamics of soil oc and n after conversion of forest to cropland. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 194, p. 188–196, 2014.

XU, E.; ZHANG, H. Aggregating land use quantity and intensity to link water quality in upper catchment of Miyun Reservoir. **Ecological Indicators**, v. 66, p. 329–339, 2016.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste trabalho indicaram que o uso e ocupação do solo por atividades antrópicas contribui para a degradação do solo e o aumento da vulnerabilidade ambiental.

O mapeamento e análise da vulnerabilidade natural serviu de base para avaliar a susceptibilidade da área devido às suas características naturais intrínsecas, indicando que o cenário de degradação existente devido as condições naturais do semiárido tropical brasileiro pode ser ainda mais agravado com a expansão do uso antrópico.

Dessa forma, é indispensável a proteção de áreas com alta vulnerabilidade, principalmente, se estiverem localizadas próximas à corpos hídricos superficiais, como é o caso das zonas ripárias. Deve existir a compatibilização dos usos suportados e manejo adequado das atividades, além de investimento em projetos eficazes de manutenção e recuperação ambiental. Sendo os mapas temáticos uma importante ferramenta para o planejamento e gestão ambiental.

A ocupação antrópica gera efeitos diretos sobre as características do solo, e a intensidade da degradação é variável em função das classes de usos. Considerando as funções ecossistêmicas desempenhadas pelo solo, a manutenção da sua qualidade é essencial para garantir a qualidade ambiental de toda a bacia hidrográfica.

Por isso, mesmo a classe gramínea não apresentando grandes modificações dos atributos físicos e químicos do solo, pode ser uma fonte de poluição para o manancial, pois em períodos de cheia o material vegetal pode ser inundado, enriquecendo a água com nutrientes, sendo recomendável que esse plantio não ocorra dentro da bacia hidráulica do reservatório. No terreno preparado, é importante que não seja realizada a queima do material, pois além de disponibilizar nutrientes em excesso, torna o solo susceptível à erosão e improdutivo a longo prazo. Para a pecuária seria interessante que o pastejo dos animais ocorresse fora da zona ripária, pois a compactação do solo favorece a erosão e as excretas aportam nutrientes que podem chegar ao corpo hídrico. Com relação ao uso urbano é necessária a fiscalização para evitar que construção sejam feitas às margens do reservatório, pois além de riscos ambientais podem ocorrer prejuízos socioeconômicos. Portanto, para mitigar a degradação é necessário selecionar os usos do solo apropriados e melhorar as práticas de manejo, para que não haja o enriquecimento excessivo de nutrientes e seja evitada a erosão.

APÊNDICES

Apêndice 1 - Área de pecuária com presença de animais pastejando



Apêndice 2 - Área urbana com construções residenciais



Apêndice 3 – Área com plantações de gramíneas (capim-elefante)



Apêndice 4 – Área com terreno preparado para plantio



Apêndice 5 – Área de caatinga, vegetação nativa da região



Apêndice 6 – Área com presença de queima de vegetação



Apêndice 7 – Correlação linear de Pearson entre os atributos físicos e químicos do solo da zona ripária do reservatório Armando Ribeiro

Gonçalves

	Areia	Argila	Silte	Ds	Dp	PT	pH	CE	Ca	Mg	HAl	K	Na	SB	CTC	V	PST	MO	P	N
Areia	-																			
Argila	-0,90**	-																		
Silte	-0,98**	0,79**	-																	
Ds	0,87**	-0,79**	-0,84**	-																
Dp	0,77**	-0,70**	-0,75**	0,88**	-															
PT	-0,82**	0,76**	0,79**	-0,95**	-0,69**	-														
pH	ns	ns	ns	0,65**	0,71**	-0,51*	-													
CE	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-												
Ca	-0,75**	0,90**	0,62**	-0,62**	ns	0,66**	ns	ns	-											
Mg	-0,81**	0,91**	0,70**	-0,68**	-0,54*	0,71**	ns	0,63**	0,95**	-										
HAl	ns	ns	0,51*	-0,62**	-0,65**	0,52*	-0,85**	ns	ns	ns	-									
K	-0,68**	0,74**	0,60*	-0,59*	-0,59*	0,51*	ns	ns	0,77**	0,66**	ns	-								
Na	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,81**	ns	ns	ns	ns	-							
SB	-0,77**	0,91**	0,65**	-0,64**	-0,51*	0,67**	0,00884	0,56*	1,00**	0,97**	ns	0,77**	ns	-						
CTC	-0,84**	0,95**	0,73**	-0,74**	-0,61*	0,75**	ns	0,52*	0,98**	0,97**	ns	0,75**	ns	0,98**	-					
V	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,78**	0,51*	ns	ns	-0,76**	ns	0,54*	ns	ns	-				
PST	0,51*	ns	ns	ns	ns	-0,53*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,86**	ns	ns	ns	-			
MO	-0,74**	0,68**	0,71**	-0,71**	-0,81**	0,56*	ns	ns	0,60*	0,55*	ns	0,85**	ns	0,61*	0,67**	ns	ns	-		
P	0,52*	ns	ns	0,54*	0,53*	-0,474	0,73**	ns	ns	ns	-0,67**	ns	0,76**	ns	ns	0,69**	0,86**	-0,54*	-	
N	-0,74**	0,74**	0,68**	-0,72**	-0,66**	0,66**	ns	ns	0,65**	0,59*	ns	0,77**	ns	0,65**	0,68**	ns	ns	0,74**	ns	-

**altamente significativo $p < 0,01$; *significativo $p < 0,05$; ns – não significativo.