



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

**CAROLINE ELIZABETH BRAZ FRAGOSO DE SOUSA MEDEIROS**

**OS IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO E EVENTO DE SECA EXTREMA  
NA QUALIDADE DA ÁGUA E DO SOLO DE UM MANANCIAL  
TROPICAL DO SEMIÁRIDO**

**Natal - RN**  
**2016**

CAROLINE ELIZABETH BRAZ FRAGOSO DE SOUSA MEDEIROS

**OS IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO E EVENTO DE SECA EXTREMA  
NA QUALIDADE DA ÁGUA E DO SOLO DE UM MANANCIAL  
TROPICAL DO SEMIÁRIDO**

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

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vanessa Becker

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Karina Patrícia Vieira da Cunha

**Natal – RN  
2016**

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede  
Catalogação da Publicação na Fonte

Medeiros, Caroline Elizabeth Braz Fragoso de Sousa .

Os impactos do uso e ocupação e evento de seca extrema na qualidade da água e do solo de um manancial tropical do semiárido / Caroline Elizabeth Braz Fragoso de Sousa Medeiros. - Natal, 2016.

71 f. : il.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vanessa Becker.

Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Karina Patrícia Vieira da Cunha.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Eutrofização - Dissertação. 2. Poluição difusa - Dissertação. 3. Seca - Eventos extremos - Dissertação. 4. Uso e ocupação do solo - Dissertação. 5. Pecuária - Dissertação. 6. Qualidade da água - Dissertação. I. Becker, Vanessa. II. Cunha, Karina Patrícia Vieira da. III. Título.

RN/UF/BCZM

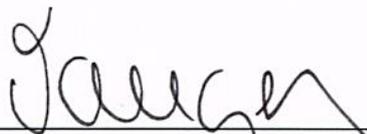
CDU 628.13

CAROLINE ELIZABETH BRAZ FRAGOSO DE SOUSA MEDEIROS

**OS IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO E EVENTO DE SECA EXTREMA  
NA QUALIDADE DA ÁGUA E DO SOLO DE UM MANANCIAL  
TROPICAL DO SEMIÁRIDO**

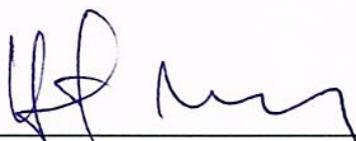
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação *stricto sensu* em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Dra. Vanessa Becker – Orientadora  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



---

Dr. Hélio Rodrigues dos Santos – Examinador Interno  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte



---

Dr. Marco Antônio Calazans Duarte - Examinador Externo  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Natal, 05 de Fevereiro de 2016.

*Aos meus quatro pilares: meus pais, meu irmão e meu marido.*

## AGRADECIMENTOS

À FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pelo financiamento da pesquisa através do projeto MEVEMUC (Monitoramento da Evaporação e Mudanças Climáticas no Rio Grande do Norte). À CAPES pela bolsa, que foi um grande auxílio para a realização deste trabalho.

Ao LARHISA (Laboratório de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) e à Universidade Federal do Rio Grande do Norte, pelo espaço concedido para realização desta pesquisa. A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da UFRN, pelos ensinamentos e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha orientadora, professora e amiga, Dra. Vanessa Becker. A senhora foi inspiração para realização deste trabalho. Agradeço por sua boa vontade, dedicação, atenção, cuidado, força e conselhos. Por essas coisas, pelo seu pulso firme, pelo seu imenso coração e pela linda pessoa que a senhora é, eu serei eternamente grata.

À minha co-orientadora, professora e amiga Dra. Karina Cunha por ser tão doce e suave. Obrigada por ter me estimulado bastante e, assim, ter me ajudado, sendo sempre muito solícita e paciente. Foi maravilhoso poder ter trabalhado com a senhora. Muito obrigada por sua dedicação e esforço.

Ao meu Deus, meu Senhor e Salvador, por me dar amor, bênçãos e também desafios para meu crescimento. Obrigada, meu Pai.

Aos meus amigos do MEVEMUC e agregados do LARHISA: Fabiana, Maricota, Silvana, Aline, Letícia, Gabriela, Hérika (obrigada pela força no QGIS), Jéssica, Fernanda, Isaac, Carlos, Camila, Radmila, Gustavo, Jurandir (obrigada pela ajuda em geoprocessamento), Neuciano e Ângela, bem como aqueles que foram para as coletas nos reservatórios. A Pedro, secretário, e Rosana, bolsista: a amizade e as conversas na copa não serão esquecidas jamais. Obrigada a todos pelo convívio, amizade e apoio! Vocês são demais!

Aos meus pais, Cícera e Ricardo, por todo amor e sacrifício para me ensinarem desde cedo o valor da educação e princípios fundamentais para ser uma boa pessoa e ter sucesso. Ao meu irmão Pedro, por sempre ter me apoiado, aconselhado e me dado uma alegre e divertida companhia. Ao meu precioso marido Ricardo, meu melhor amigo e grande companheiro, por seu amor, força e dedicação. Sem vocês, eu não teria conseguido chegar até aqui, por isso: muito obrigada! Eu amo todos vocês!

E aos meus demais amigos e familiares que me ajudaram com palavras de ânimo e força. Obrigada por serem tão especiais. Obrigada pela amizade, conversas e distrações. Eu os guardarei para sempre comigo!

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	ix
<b>APRESENTAÇÃO</b> .....	x
<b>RESUMO</b> .....	xi
<b>ABSTRACT</b> .....	xii
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>ÁREA DE ESTUDO</b> .....	16
<b>CAPÍTULO 1 - IMPACTOS DE UM EVENTO DE SECA EXTREMA NA DEGRADAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO TROPICAL DO SEMIÁRIDO</b> .....	18
RESUMO.....	18
ABSTRACT.....	19
1. INTRODUÇÃO.....	20
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
2.1. Amostragem limnológica.....	22
2.2. Análise das amostras de água.....	23
2.3. Análise dos dados.....	23
3. RESULTADOS.....	24
4. DISCUSSÃO.....	28
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31
<b>CAPÍTULO 2 - USO E OCUPAÇÃO ALTERAM ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO E FAVORECE A POLUIÇÃO DIFUSA PARA UM RESERVATÓRIO TROPICAL DO SEMIÁRIDO</b> .....	35
RESUMO.....	35
ABSTRACT.....	36
1. INTRODUÇÃO.....	37
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
2.1. Avaliação por meio de geoprocessamento e mapeamento da bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras.....	38
2.2. Análise dos atributos físicos e químicos do solo.....	40
2.3. Cálculo da erosão do solo e da exportação de matéria orgânica e nutrientes para o reservatório.....	41
2.4. Análises estatísticas dos dados.....	43
3. RESULTADOS.....	44
3.1. Análise de geoprocessamento dos atributos da bacia de drenagem do reservatório Passagem das Traíras.....	44

3.2. Atributos físicos e químicos do solo.....	47
3.3. Erosão hídrica e contribuição dos solos sob usos antrópicos para a eutrofização do reservatório.....	53
4. DISCUSSÃO.....	54
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>62</b>
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema geral dos efeitos do uso e ocupação do solo e eventos extremos de seca sobre o processo de eutrofização de mananciais superficiais lênticos no semiárido brasileiro. ....	15
Figura 2 - Localização do reservatório Passagem das Traíras na Bacia Piranhas-Assú, no semiárido do Rio Grande do Norte. ....	16
Figura 3 – Valores das precipitações mensais acumuladas para o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014 do local de estudo, série histórica de precipitações mensais da região de 1963 a 2015 e índice SPI avaliado para a área de estudo a partir da variável SPI 12. ....	24
Figura 4 - Variação volumétrica do reservatório Passagem das Traíras, em função da capacidade máxima de acumulação, para o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014.....	25
Figura 5 - Concentrações de fósforo total (PT), ortofosfato (PO <sub>4</sub> ) e clorofila-a do reservatório Passagem das Traíras, para o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014. ....	25
Figura 6 – Valores de medianas das concentrações de: a) fósforo total (PT), b) clorofila-a (Chl-a), c) nitrogênio inorgânico dissolvido (NID = NH <sub>3</sub> + NO <sub>3</sub> ), e d) sólidos em suspensão inorgânicos e orgânicos do reservatório passagem das Traíras, para os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.....	26
Figura 7 - Regressão linear entre os valores logaritmizados de volume (Vol) e fósforo total (PT) para o reservatório Passagem das Traíras.....	26
Figura 8 - Regressão linear entre os valores logaritmizados de volume (Vol) e clorofila-a (Chla) para o reservatório Passagem das Traíras.....	27
Figura 9 - Análise de componentes principais das variáveis analisadas para o reservatório Passagem das Traíras, para o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014. ....	28
Figura 10 - Mapa de delimitação da bacia de drenagem e das contribuições de fluxo ao Reservatório Passagem das Traíras.....	44
Figura 11 - Mapa de classificação dos solos, segundo shape e classificação da EMBRAPA (Fonte: a autora).....	45
Figura 12 - Mapa de uso e ocupação das atividades antrópicas encontradas por classificação supervisionada para a bacia de drenagem do reservatório Passagem das Traíras. ....	46
Figura 13 - Análise de componente principais (ACP) de atributos químicos e físicos de solo sob diferentes formas de uso e ocupação na bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras, São José do Seridó, RN. ....	52
Figura 14 - Taxas de: a) solo perdido por erosão; b) exportação de matéria orgânica; c) exportação de fósforo; e d) exportação de nitrogênio, de acordo com as classes de uso e ocupação.....	53

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1- Dados das duas cenas cedidas pela instituição United States Geological Survey.....	39
Tabela 2 - Coordenadas geográficas do ponto de coleta de água no reservatório Passagem das Traíras e de cada ponto de amostragem de solo feita em campo. ....	42
Tabela 3 - Valores dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo para obtenção do valor de solo erodido, de acordo com as classes de uso e ocupação definidas em campo.....	43
Tabela 4 - Valores de área e porcentagens correspondentes para cada classe de uso e ocupação identificada para a bacia do reservatório Passagem das Traíras.....	46
Tabela 5 - Valores de acurácias de usuário e produzidas durante o processo de classificação supervisionada da bacia de drenagem do reservatório Pasagem das Traíras.....	47
Tabela 6 - Atributos físicos de solos sob diferentes formas de uso e ocupação na bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras, São José do Seridó, RN.....	48
Tabela 7 - Atributos químicos de solos sob diferentes formas de uso e ocupação na bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras, São José do Seridó, RN.....	50

## **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.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Vanessa Becker e co-orientação da Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Karina Patrícia Vieira da Cunha. Esta pesquisa foi parte integrante do projeto “Monitoramento da Evaporação e Mudanças Climáticas no Rio Grande do Norte”, financiado pela FINEP/CNPq (processo n° 52009).

O efeito combinado do regime hidrológico peculiar do semiárido e do uso e ocupação do solo da bacia sobre a qualidade da água de um manancial de abastecimento 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. Os artigos correspondentes aos capítulos dessa dissertação serão submetidos ao periódico “Environmental Science and Pollution Research”, classificado como A1 do Qualis/CAPES, da área de Engenharias I.

## **OS IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO E EVENTO DE SECA EXTREMA NA QUALIDADE DA ÁGUA E DO SOLO DE UM MANANCIAL TROPICAL DO SEMIÁRIDO.**

### **RESUMO**

Atividades antrópicas alteram as características do solo, provocando a deterioração de sua qualidade. O uso e ocupação do solo em bacias de drenagem de mananciais de abastecimento podem alterar a qualidade ambiental do solo e, assim, favorecer a veiculação hídrica dos poluentes, ampliando o potencial do solo em atuar como fonte difusa de poluição. Na região semiárida brasileira, os solos são geralmente rasos e apresentam elevada suscetibilidade à erosão, favorecendo a entrada de sedimento e nutrientes nos mananciais superficiais, contribuindo para o processo de eutrofização da água. Além disso, a região possui altas temperaturas e taxas de evapotranspiração, que são geralmente maiores que as taxas de precipitações, causando um balanço hídrico negativo e grandes perdas de volume por evaporação. A redução do volume eleva a concentração de nutrientes e, por conseguinte, agrava o processo de eutrofização, deteriorando a qualidade da água. Diante disso, nós hipotetizamos que o processo de eutrofização dos reservatórios do semiárido é intensificado tanto pelos eventos climáticos extremos de seca prolongada, quanto pela poluição difusa por meio do uso e ocupação da bacia. O trabalho teve como objetivo testar se as atividades de uso e ocupação do solo da bacia e eventos de seca severa intensificam o processo de eutrofização de um manancial tropical do semiárido. Para verificar a influência das atividades realizadas na bacia de drenagem do manancial sobre a qualidade do solo e o processo de eutrofização, foi realizado o mapeamento dos tipos de uso e ocupação, bem como o cálculo da erosão para cada atividade e a avaliação da qualidade do solo da zona ripária e da qualidade da água do reservatório. Para a análise da água, a amostragem foi realizada mensalmente no ponto mais profundo, próximo à barragem. Para o solo, foram retiradas amostras compostas deformadas para a análise dos atributos físicos e químicos, segundo as classes de uso e ocupação identificadas. Os resultados demonstraram que secas extremas reduzem drasticamente o volume do reservatório e aumentam a concentração de nutrientes, contribuindo, assim, para maior degradação da qualidade da água. Além disso, verificamos que as atividades humanas desenvolvidas na bacia de drenagem favorecem a poluição difusa, através do aumento suscetibilidade à erosão e dos teores de nutrientes do solo. Sumarizando, os nossos resultados corroboraram a hipótese investigada de que atividades de uso e ocupação e eventos de secas extremas produzem um efeito combinado que proporciona a intensificação do processo de eutrofização de mananciais do semiárido.

**Palavras-chave:** Eutrofização, poluição difusa, eventos extremos, seca, pecuária.

## **IMPACTS OF THE LAND USE AND A EXTREME DROUGHT EVENT ON THE WATER AND SOIL QUALITY OF A SEMIARID TROPICAL RESERVOIR.**

### **ABSTRACT**

Human activities alter soil features, causing the deterioration of its quality. Land use and occupation in drainage basins of water supply reservoirs can change the environmental soil quality and, thus, lead to the expansion of the soil potential of being a diffuse pollution source. In the Brazilian semiarid region, the soils are generally shallow with high susceptibility to erosion, favoring the sediment and nutrients input into the superficial waterbodies, contributing to the eutrophication process. Moreover, this region has high temperatures and high evapotranspiration rates, that are generally higher than the precipitation rates, causing a negative hydric balance and big volume losses by evaporation. The water volume reduction increases the nutrients' concentration and, therefore, exacerbates the eutrophication process, deteriorating the water quality. Thereby, we hypothesized that the eutrophication process of semiarid reservoirs is intensified both by the extreme climatic events of prolonged drought, and by the diffuse pollution due to the basin land use and occupation. The study aimed to test whether the land use and occupation activities of the basin and the severe drought events intensify the eutrophication process of a semiarid tropical reservoir. To verify the influence of human activities carried out in the water supply of drainage basin on the soil quality and the eutrophication process, we conducted the mapping of the kind of use and occupation, as well the calculation of erosion for each activity and the soil quality evaluation of the riparian zone and water quality of the water supply. For the water analyses, the samplings were carried out monthly in the deeper point, near dam. For the soil, deformed composite samples were taken for the physical and chemical attributes analysis, according to the identified land use and occupation classes. The results showed that extreme droughts drastically reduces the water volume and elevates the nutrients concentration, contributing, thus, to a bigger degradation of water quality. Furthermore, we verified that human activities in the drainage basin promote the diffuse pollution, by increasing the soil susceptibility to erosion and nutrients contents. Summarizing, our results support the investigated hypothesis that activities of land use and occupation and extreme drought generate a combined effect that provide the intensification of eutrophication process of semiarid reservoirs.

**Key-words:** Eutrophication, diffuse pollution, extreme events, drought, livestock.

## INTRODUÇÃO

A qualidade da água de sistemas continentais resulta da atuação conjunta dos processos hidrológicos, mudanças climáticas, ciclos biogeoquímicos e influência antropogênica (Mosley 2015), além das características ambientais da bacia de drenagem. Atividades humanas, entretanto, alteram a bacia hidrográfica além do aspecto visual (Wen et al. 2011), implicando principalmente nas modificações dos elementos constituintes, como os ambientes aquáticos, terrestres e a atmosfera. Isso ocorre porque, em uma bacia hidrográfica, esses ambientes encontram-se integrados por meio das interações do ciclo hidrológico que ocorrem na bacia.

Dessa maneira, as consequências de alterações do uso da terra não se restringem ao solo, podendo ser estendidas também para os sistemas hídricos, sejam as águas superficiais ou subterrâneas (Mouri 2015). Por esse motivo, a bacia é considerada a unidade ideal de estudo, sendo necessário o estudo investigativo e holístico das suas características, a fim de compreender seu funcionamento e promover correto manejo e mitigação dos corpos aquáticos, bem como preservar a biodiversidade da paisagem como um todo (Barbosa et al. 2012).

A agricultura, a pecuária e o desmatamento degradam a qualidade do solo, pois mudam suas propriedades físicas, químicas e biológicas (Islam & Weil 2000; Guo et al. 2015). Algumas dessas modificações são: o aumento do grau de compactação superficial do solo e da densidade aparente, assim como redução da taxa de infiltração, da porosidade e da estabilidade de agregados (Islam & Weil 2000), o que promove aumento da erodibilidade do solo. Além disso, pode haver o aumento do teor de nutrientes, que, se somado ao aumento da perda do solo por erosão, favorece o transporte de sedimentos e fluxo de nutrientes para corpos hídricos (Ismail & Najib 2011).

Isso faz com que o solo atue como fonte difusa de poluição aos mananciais superficiais, aumentando o risco de assoreamento e eutrofização desses sistemas (Carpenter et al. 1998; Mouri et al. 2011). A eutrofização consiste no enriquecimento da água por nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, acarretando no crescimento excessivo das plantas aquáticas (Carpenter et al. 1998), desequilíbrio do ecossistema aquático e degradação da qualidade da água dos corpos lânticos (Barbosa et al. 2012).

As mudanças climáticas, por meio dos eventos extremos (chuvas torrenciais e secas prolongadas), alteram a disponibilidade de água pela variação da quantidade e intensidade das precipitações, modificando também as taxas de nutrientes transportados para os sistemas aquáticos superficiais (Paerl et al. 2014; Hayes et al. 2015). Dessa forma, os eventos hidrológicos extremos resultam em grandes distúrbios ambientais, podendo remodelar tanto a geomorfologia, quanto a estrutura do habitat, transformando os processos dos ecossistemas e sua

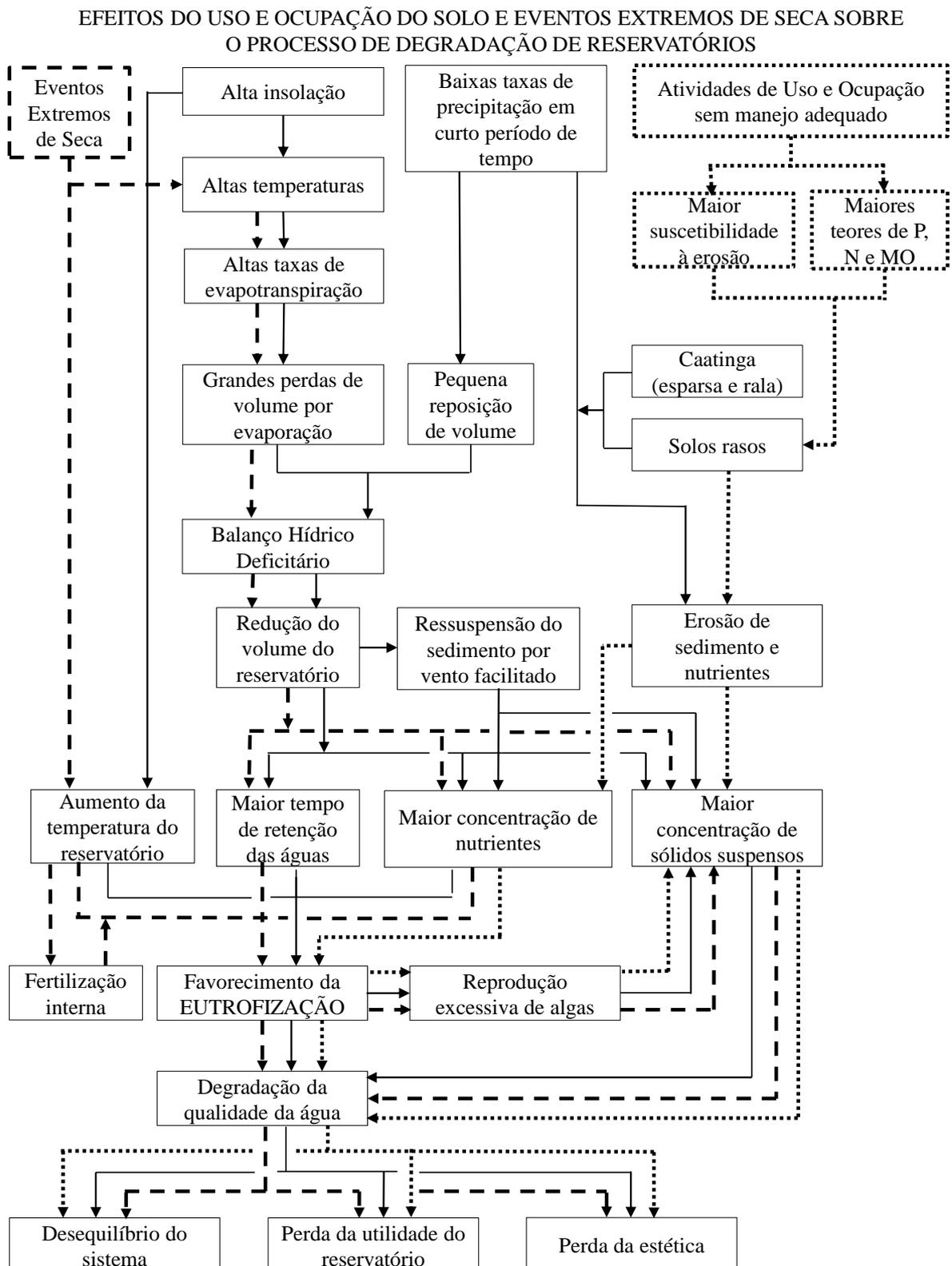
biodiversidade (Reich & Lake 2015). Contudo, os efeitos das mudanças climáticas variam de acordo com a localização geográfica, clima da região, atividades de uso e ocupações realizadas na bacia e características intrínsecas dos sistemas aquáticos, como área do espelho de água e profundidade (Jeppesen et al. 2015).

A região Nordeste do Brasil é sujeita a recorrentes eventos de secas (Bouvy et al. 2000). Nesses períodos, as altas temperaturas aliadas à redução das precipitações diminuem o escoamento superficial e, por conseguinte, o nível das águas, bem como o potencial de diluição e autodepuração de mananciais superficiais (Mimikou et al. 2000). Essas alterações causam um balanço hídrico negativo (Barbosa et al. 2012), aumentando o tempo de residência da água (Beklioglu and Tan 2008; Medeiros et al. 2015), o que intensifica a concentração de nutrientes e a eutrofização desses corpos hídricos (Costa et al. 2016).

Há previsões de eventos de seca ainda mais intensos e frequentes para as regiões semiáridas (IPCC 2014), o que fará com que essas regiões fiquem ainda mais quentes e secas (Brasil et al. 2015), com maiores flutuações do volume de água armazenado (Özen et al. 2010; Medeiros et al. 2015). Com isso, as propriedades físicas e químicas da água, assim como a disponibilidade de luz e a concentração de nutrientes serão alteradas drasticamente (Braga et al. 2015), exacerbando a eutrofização, assim como aumentando o risco de florações de cianobactérias e mudanças na cadeia trófica (Jeppesen et al. 2015).

Além disso, o semiárido brasileiro tem características próprias e peculiares, que constituem em uma vulnerabilidade (Figueirêdo et al. 2007), que vão além das altas taxas de insolação e evapotranspiração. A região possui solos rasos, sua vegetação é a caatinga, caracterizada por ser escassa e rala, e o período chuvoso é constituído de precipitações intensas em curto período de tempo (Bezerra Júnior & Silva 2007; Pereira & Dantas Neto 2014), o que favorece a erosão dos solos rasos e o carreamento de sedimentos e nutrientes aos corpos aquáticos.

A combinação de eventos hidrológicos extremos com atividades antrópicas sem manejo adequado pode resultar em graves consequências para a qualidade da água de mananciais (Figura 1). Diversos estudos verificaram que tanto as mudanças climáticas, quanto o uso e ocupação do solo têm relação com a concentração de sólidos suspensos (Wilson & Weng 2011), dinâmica e concentração nutrientes (Tu 2009; Wilson and Weng 2011; Nielsen et al. 2014), composição fitoplanctônica (Hayes et al. 2015), qualidade da água (Lee & Biggs 2015), cadeia trófica (Lee & Biggs 2015) e erosão do solo (Serpa et al. 2015) em uma bacia hidrográfica.



**Figura 1** - Esquema geral dos efeitos do uso e ocupação do solo e eventos extremos de seca sobre o processo de eutrofização de mananciais superficiais lênticos no semiárido brasileiro. Linha contínua = processo de eutrofização causado pelas condições naturais do semiárido; Linha tracejada = efeitos adicionais ao processo de eutrofização provocados por eventos de seca extrema; Linha pontilhada = efeitos adicionais ao processo de eutrofização provocados por atividades de uso e ocupação do solo da bacia de drenagem (Fonte: a autora).

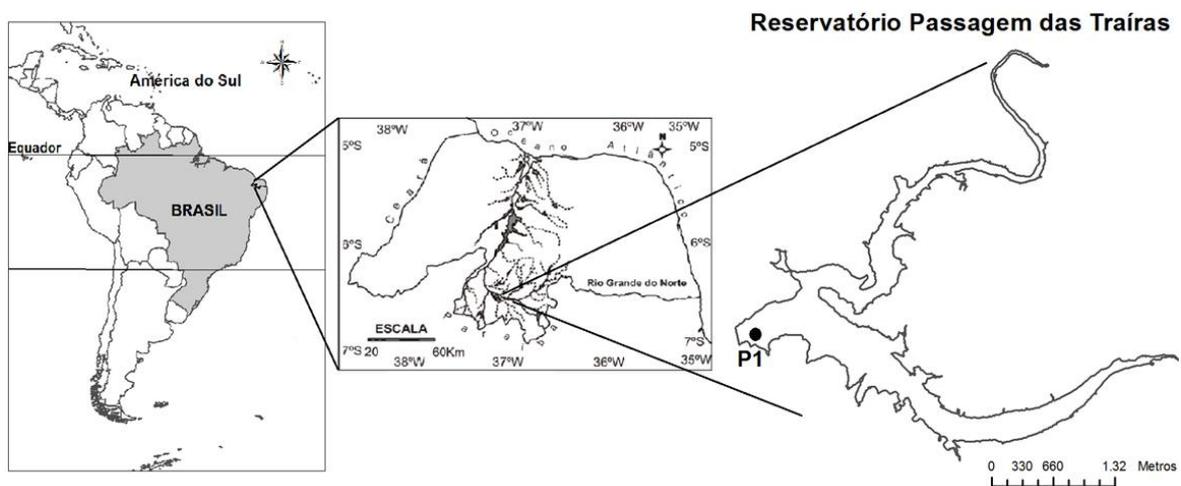
Dessa forma, o estudo do comportamento de mananciais durante a ocorrência de eventos extremos, a investigação das atividades de uso e ocupação do solo, bem como a quantificação da contribuição dessas atividades por poluição difusa aos mananciais superficiais são essenciais, especialmente no semiárido nordestino brasileiro.

Nesse contexto, o monitoramento pode ser utilizado para verificação dos efeitos de secas extremas sobre o manancial (Braga et al. 2015; Brasil et al. 2015; Medeiros et al. 2015; Costa et al. 2016) e análises de imagens de satélite podem ser úteis na identificação das atividades antrópicas, assim como áreas suscetíveis à erosão e fluxo de sedimentos em uma bacia hidrográfica (Kovacs et al. 2012).

Com base no que foi abordado anteriormente, nossa hipótese de trabalho é que o processo de eutrofização dos reservatórios do semiárido é intensificado pelos eventos climáticos extremos de seca prolongada e pela poluição difusa advinda do uso e ocupação da bacia. Sendo assim, nosso objetivo foi testar se se tanto os eventos de seca extrema, quanto o uso e ocupação do solo afetam a qualidade da água.

## ÁREA DE ESTUDO

A bacia do reservatório Passagem das Traíras ( $06^{\circ}30'47''S$ ;  $36^{\circ}56'14''W$ ), localizado em São José do Seridó, município da região Seridó, no semiárido do Rio Grande do Norte, Brasil, foi estudada neste trabalho (Figura 2). O reservatório, construído em 1994, constitui um dos mais importantes mananciais do estado e é utilizado para múltiplas finalidades, como o abastecimento público de Jardim do Seridó e parte de Caicó, além de defesa contra cheias, irrigação, lazer e pesca (SEMARH - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte 2015).



**Figura 2** - Localização do reservatório Passagem das Traíras na Bacia Piranhas-Assú, no semiárido do Rio Grande do Norte.

O manancial pertence à bacia hidrográfica Piranhas-Açu, mais especificamente à sub-bacia do rio Seridó, e formou-se através do represamento desse mesmo rio (SEMARH 2015). A profundidade máxima de barragem é igual a 25,5 m e a média é igual a 4,77 m totalizando uma área de 1.043 hectares, com capacidade máxima de armazenamento de aproximadamente 50 milhões de m<sup>3</sup> (SEMARH 2015).

O clima da região é do tipo BSh (Kotteck et al. 2006), caracterizado por ser quente e seco, com altas taxas de evaporação e evapotranspiração. Além disso, a região conta com uma extrema irregularidade temporal e espacial das chuvas, havendo um curto período chuvoso de 600mm (SEMARH 2015) nos meses de fevereiro a maio e uma longa estiagem no restante dos meses do ano (Bezerra et al. 2014). Desse modo, o balanço hídrico geralmente é deficitário, o que resulta no aumento da concentração de nutrientes e deterioração da qualidade da água (Barbosa et al. 2012).

Além disso, o reservatório Passagem das Traíras está inserido no Polígono da Seca, área que é sujeita a secas recorrentes (Bouvy et al. 2000). Devido à escassez de chuvas vivenciada nos anos 2012 e 2013, o reservatório está com apenas 670.369 m<sup>3</sup> (abaixo do volume morto de 924.598 m<sup>3</sup>), o que corresponde a 1,35 % de sua capacidade total (SEMARH 2015).

A estrutura geológica local (Seridó Oriental) data do Pré-Cambriano e é composta predominantemente por rochas ígneas e metamórficas, as quais compoem a formação cristalina da região e conferem à região um baixo potencial hídrico sub-superficial (Bezerra Júnior & Silva 2007). Por isso, os mananciais superficiais da região dependem diretamente das taxas de precipitação, tanto para alimentação dos fluxos dos rios intermitentes contribuintes (Barbosa et al. 2012), quanto para a manutenção de seu volume.

O relevo da área de estudo é composto pela Depressão Sertaneja e pelo Planalto da Borborema (Bezerra Júnior & Silva 2007). Os solos são classificados como Luvissole (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA 1971), caracterizados por serem férteis naturalmente, rasos e muito erodíveis na estação chuvosa e a vegetação é formada por plantas de pequeno porte bem espaçadas (Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente - IDEMA 2008).

## **CAPÍTULO 1**

### **IMPACTOS DE UM EVENTO DE SECA EXTREMA NA DEGRADAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE UM RESERVATÓRIO TROPICAL DO SEMIÁRIDO**

#### **RESUMO**

A qualidade da água de reservatórios de abastecimento humano está sujeita às mudanças hidrológicas da bacia hidrográfica, especialmente na região semiárida. Períodos de chuva podem aumentar o volume do reservatório, diluindo a concentração de sólidos suspensos e nutrientes, refletindo em uma melhora da transparência da água. De acordo com as condições do solo e da cobertura do entorno, durante a estação chuvosa pode ocorrer erosão de solo e lixiviação de nutrientes, ocasionando o assoreamento e a intensificação da eutrofização. Em períodos de estiagem, há predominância da perda de volume por evaporação, concentração dos nutrientes e, conseqüentemente, agravamento do processo de eutrofização do corpo aquático. A região semiárida brasileira conta com altas temperaturas durante todo o ano, elevadas taxas de evaporação e longos períodos de escassez de precipitações. O período chuvoso é curto e intenso, sendo, geralmente, insuficiente para reposição do volume evaporado. Aqui testamos a hipótese de que, em eventos de seca extrema, há maior perda de volume de água e intensificação do processo de eutrofização do manancial. Sendo assim, este trabalho teve como objetivo testar se o prolongamento da seca degrada a qualidade da água de um reservatório eutrófico tropical do semiárido. Para isso, foi realizado o monitoramento mensal da qualidade da água, no ponto mais profundo, próximo à barragem, de setembro de 2011 a dezembro de 2014. Esse período foi categorizado em função do regime de precipitações segundo o Índice de Precipitação Padronizada (SPI12). Os resultados mostraram que o período de maior volume esteve fortemente relacionado com transparência da água e que os anos de menores volumes estiveram relacionados com variáveis referentes à eutrofização (ortofosfato e fósforo total) e sólidos inorgânicos em suspensão. Os dados obtidos, portanto, corroboram a hipótese de que eventos de seca extrema agravam a degradação da qualidade da água. Além disso, notamos um gradiente temporal de intensificação da eutrofização em virtude dos eventos extremos de seca. Sendo assim, este trabalho demonstra os efeitos negativos de uma seca severa/extrema sobre um manancial do semiárido, que, mesmo sob precipitações normais após o período seco, não apresentou melhoras na qualidade da água.

**Palavras-chave:** Eutrofização, semiárido, seca prolongada, mudanças climáticas.

## CHAPTER 1

### IMPACTS OF A DROUGHT EXTREME EVENT ON THE WATER QUALITY DEGRADATION OF A SEMIARID TROPICAL RESERVOIR

#### ABSTRACT

The water quality of water supply reservoir is subject to hydrological changes of the drainage basin, especially in semiarid region. The rainy seasons can increase the water volume, diluting suspended solids and nutrient concentrations, reflecting in a better water transparency. Depending of the soil and riparian zone cover conditions, during the rainy season it may occur the soil erosion and nutrient input, causing siltation and intensification of eutrophication. During the dry periods, there is the predominance of volume loss by evaporation, concentrating nutrients and, consequently, aggravating the waterbody eutrophication process. The Brazilian semiarid region has high temperatures during the year, high evaporation rates and long periods of rainfall scarcity. The rainy season is short and intense, being, generally, insufficient to evaporated volume restitution. Here we test the hypothesis that, in extreme drought events, there is a bigger volume loss and intensification of the eutrophication process. Therefore, this work aimed to test whether prolonged drought influences on the water quality of a semiarid tropical reservoir, under normal precipitation and extreme drought events. For this, we carried out the monthly water quality monitoring, in the deeper point, near dam, from September 2011 to December 2014.

This period was categorized according to the precipitation regime, by the Standard Precipitation Index (SPI12). The results showed that the high volume period was strongly related to water transparency, and the years of lowest volumes were related to eutrophication variables (orthophosphate and total phosphorus) and inorganic suspended solids. The data, therefore, support the hypothesis that extreme drought events aggravate the water quality deterioration. Moreover, we noticed a temporal gradient of the eutrophication intensification, due to the extreme drought events. Thus, this study demonstrates the negatives effects of a severe/extreme drought on a semiarid water supply reservoirs, even under normal precipitation after the dry season, didn't show an improvement on water quality.

**Key-words:** eutrophication, semi-arid, prolonged drought, climate changes.

## 1. INTRODUÇÃO

A eutrofização consiste no enriquecimento da água por nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio, resultando no aumento excessivo da produtividade primária (Carpenter et al. 1998). Esse processo promove o crescimento rápido e excessivo de algumas espécies do fitoplâncton (inclusive cianobactérias potencialmente tóxicas), reduzindo a transparência do sistema e aumentando o teor de matéria orgânica. Dessa maneira, ocorre a intensificação da atividade microbiana de decomposição e o decaimento da concentração de oxigênio do corpo aquático, bem como morte de peixes e de outros organismos, resultando na perda da estética e utilidade do manancial (Carpenter et al. 1998).

O processo de eutrofização acontece naturalmente nos corpos aquáticos, porém pode ser acelerado pelo homem através do favorecimento da entrada de nutrientes aos mananciais por atividades de uso e ocupação do solo (eutrofização artificial) (Carpenter et al. 1998), causando consequências em maiores proporções. Devido à eutrofização, muitos reservatórios e lagos no mundo perderam a capacidade de abastecimento humano, de manutenção da vida aquática e de recreação (Vidal & Neto 2014), de forma que constitui um problema global (Beyhan & Kaçikoç 2014).

No semiárido do Brasil, os mananciais de abastecimento constituem a principal fonte de água para consumo humano e suprem as necessidades doméstica e industrial, bem como de irrigação, dessedentação animal, pesca, aquicultura e lazer, sendo essenciais para o desenvolvimento da região (Bouvy et al. 2000; Freitas et al. 2011). Entretanto, diversos reservatórios experimentam impactos negativos na qualidade da água causados tanto pelas atividades humanas (Vidal & Neto 2014), quanto pelas condições naturais da região semiárida (Barbosa et al. 2012; Eskinazi-Sant'Anna et al. 2013).

As características peculiares do semiárido brasileiro favorecem o agravamento do estado trófico dos reservatórios, pois constituem uma alta vulnerabilidade ambiental (Figueirêdo et al. 2007). Em períodos de estiagem, a falta de chuvas e a intensa taxa de insolação (Bezerra Júnior & Silva 2007) provoca grandes perdas de volume por evaporação e um balanço hídrico negativo (Barbosa et al. 2012).

Isso conduz a um aumento do tempo médio de renovação da água dos reservatórios (Xu et al. 2011; Mosley 2015), concentrando os nutrientes no sistema (Braga et al. 2015) e favorecendo a proliferação de algas (Santos et al. 2014a; Medeiros et al. 2015). Cabe ainda dizer que, em épocas de estiagens prolongadas, o consumo de água tende a aumentar, de forma que as flutuações anuais e interanuais de níveis da água podem sobrepujar as variações normais do nível da água causados pelo clima (Zohary & Ostrovsky 2011).

O período chuvoso no semiárido é marcado por precipitações intensas em um curto período (Barbosa et al. 2012). Com as chuvas, o volume do reservatório tende a aumentar, fazendo com que ocorra a diluição das concentrações de nutrientes e atenuação do processo de eutrofização (Bouvy et al. 2003; Beklioglu & Tan 2008). Entretanto, pode ocorrer o depósito de sedimento por erosão, em virtude da lixiviação dos solos rasos e da vegetação escassa e rala (caatinga), propiciando maior carreamento de nutrientes ao corpo hídrico (Barbosa et al. 2012).

A irregularidade e a sazonalidade do regime de precipitações causam flutuações frequentes em reservatórios (Geraldine & Boavida 2005) e, por serem lagos artificiais e geralmente rasos (Bouvy et al. 2000), os reservatórios do semiárido são mais sensíveis a flutuações do nível de água e à entrada de nutrientes (Beklioglu & Tan 2008; Zohary & Ostrovsky 2011). Dessa forma, os reservatórios do semiárido apresentam flutuações sazonais, podendo alcançar o volume máximo no final da estação chuvosa e menores volumes acumulados no final da estação de seca (Zohary & Ostrovsky 2011).

Além disso, os eventos de seca são recorrentes no Nordeste do Brasil e influenciam diretamente no nível volumétrico e, por conseguinte, na qualidade da água desses mananciais (Bouvy et al. 2000). A combinação desses fatores facilita a redução volumétrica, fazendo com que, em anos mais secos, alguns reservatórios sequem completamente (Barbosa et al. 2012). Desse modo, a qualidade da água está sujeita ao regime hidrológico peculiar do semiárido, que regula as flutuações do volume desses sistemas (Braga et al. 2015; Brasil et al. 2015; Medeiros et al. 2015; Costa et al. 2016), e os reservatórios apresentam tendências temporais em função dos eventos de seca (Medeiros et al. 2015).

Entretanto, estudos com previsões sobre mudanças climáticas consideram a ocorrência de eventos de seca ainda mais intensos e frequentes para o semiárido brasileiro, assim como para outras partes do mundo (IPCC 2014). Dessa maneira, futuramente, as secas extremas provocarão reduções volumétricas ainda mais drásticas, que implicarão em alterações a maiores proporções sobre a disponibilidade de nutrientes, estado de trofia e funcionamento de ecossistemas aquáticos superficiais (Beklioglu & Tan 2008; Roland et al. 2012). Isso fará com que esses ambientes fiquem ainda mais sensíveis a cargas alóctones de nutrientes (Trolle et al. 2011).

Em eventos de seca severa, mesmo que não haja entrada de nutrientes pela inexistência de escoamento superficial, outros processos internos ao manancial podem alterar os ciclos biogeoquímicos pela modificação das vias de transporte e taxas de transformações de nutrientes (Hayes et al. 2015). A redução significativa do volume pode aumentar o tempo de retenção da água e a temperatura do corpo aquático, bem como facilitar a ressuspensão de sedimento através

da ação do vento, e assim, alterar as concentrações de nutrientes e matéria orgânica, estimulando o processo de fertilização interna e intensificação da eutrofização (Mosley 2015).

Estudos recentes de modelagem demonstram que num cenário futuro de maior aquecimento e seca, caso haja um aumento de cargas alóctones a corpos aquáticos, é muito provável que um manancial superficial tenha a qualidade de sua água degradada, apresentando maior turbidez e dominância de cianobactérias potencialmente tóxicas (Nielsen et al. 2014). Portanto, a compreensão dos efeitos das mudanças climáticas sobre esses sistemas consiste num grande passo para adaptação e melhor gerenciamento em cenários de crise hídrica (Yihdego et al. 2015).

Haja vista que os eventos hidrológicos extremos são inevitáveis, o estudo e a compreensão das mudanças climáticas são importantes para o aprimoramento de planejamentos, projetos, gestão e restauração de ecossistemas (Reich & Lake 2015). Tanto as inundações quanto as secas extremas promovem impactos sobre os ecossistemas terrestres e os aquáticos a estes associados, entretanto mais é estudado sobre as enchentes do que sobre as secas (Reich & Lake 2015). Diante disso, aqui nós testamos a hipótese de que um evento extremo de seca prolongada acelera o processo de eutrofização de um manancial do semiárido pela redução do volume de água.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Amostragem limnológica**

As coletas de água foram realizadas mensalmente no reservatório Passagem das Traíras, durante o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014, no ponto amostral próximo à barragem, local da captação da água para o abastecimento, sendo o ponto mais profundo do reservatório (P1). *In situ*, as variáveis pH, temperatura, condutividade e oxigênio dissolvido foram medidas com o auxílio de uma sonda multiparamétrica HIDROLAB (modelo DS5) a cada 1,0 metro de profundidade, da superfície ao fundo, e a transparência da água foi medida por meio do disco de Secchi.

Para as análises de turbidez, nutrientes (fósforo total, ortofosfato, nitrato e amônia), sólidos suspensos (inorgânicos e orgânicos) e clorofila *a*, foram coletadas amostras integradas no epilímnio com uma garrafa de Van Dorn (5L), segundo o perfil de oxigênio fornecido pela sonda multiparamétrica. As amostras coletadas foram divididas em sub-amostras, as quais foram armazenadas em garrafas de polietileno lavadas com solução de ácido clorídrico (HCl) a 10% e água deionizada, e mantidas a baixa temperatura em caixas térmicas com gelo durante o seu

transporte até o laboratório. Apenas as amostras para análise de nitrogênio amoniacal tiveram seu pH fixado em 2 ou menos.

## **2.2. Análise das amostras de água**

Para avaliar a qualidade da água do reservatório, foram feitas análises em laboratório de turbidez, nutrientes (ortofosfato e fósforo total, nitrato e amônia), sólidos suspensos totais, inorgânicos e orgânicos, e clorofila *a*. A determinação das concentrações de sólidos orgânicos e inorgânicos foi feita por meio da técnica de ignição em forno, com a mufla a 550° C (APHA 1998). O método colorimétrico foi utilizado com as amostras não filtradas para determinar as concentrações de fósforo total (Valderrama 1981), com as amostras filtradas com filtros de fibra de vidro (Ø 47 mm e 1,5 µm de porosidade) para análise de ortofosfato (Murphy and Riley 1962) e nitrato (Valderrama 1981) e com os filtros usados na filtração das amostras para determinação da concentração de clorofila *a* (Jepersen and Christoffersen 1988).

## **2.3. Análise dos dados**

Os dados de série histórica (de 1963 a 2015) de precipitações foram fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN – Estação EMATER/Passagem) e os dados de variações volumétricas foram cedidos pela SEMARH. Esses dados foram utilizados para análise das relações entre as variáveis limnológicas, morfométricas, pluviométricas e de qualidade da água. O estado trófico foi estimado por meio das concentrações de fósforo e clorofila *a*, segundo os parâmetros indicados por Thornton & Rast (1993).

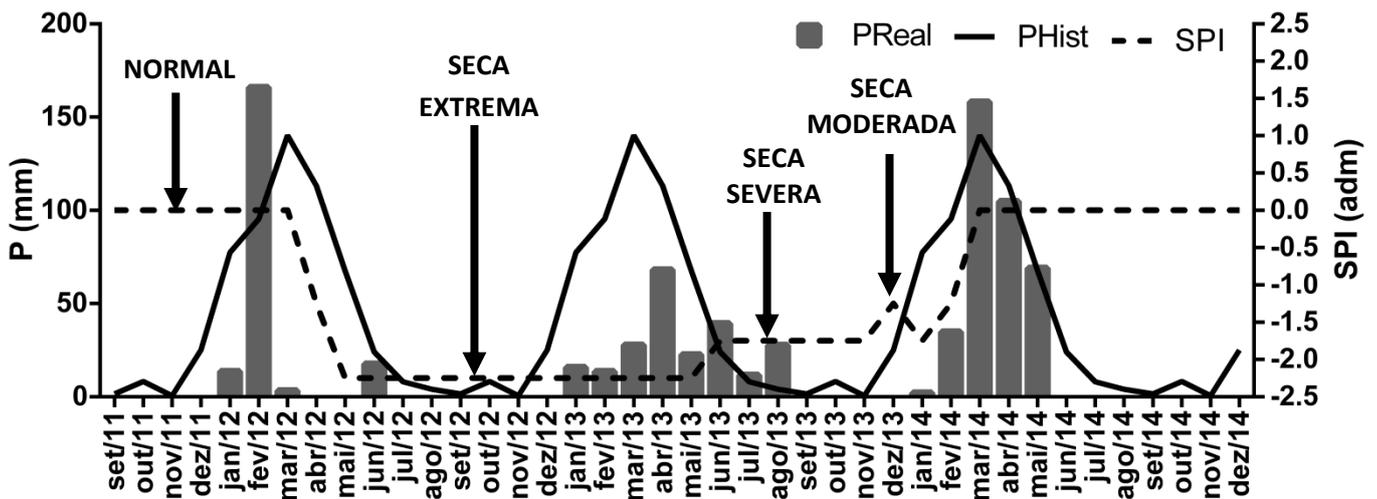
Para a avaliação mensal do stress hídrico provocado pelas variações da intensidade das precipitações clima e observação do efeito tardio da seca sobre a qualidade da água, foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizada (IPP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET 2015). Este índice avalia o déficit de abastecimento de água em relação ao tempo de duração da escassez de precipitação, podendo ser usado para monitoramento e classificação das condições climáticas de diferentes regimes hidrológicos, sob múltiplas escalas de tempo (Zhang et al. 2015). O IPP foi avaliado para a variável SPI12, pois esta representa de maneira mais fiel o comportamento de reservatórios e mananciais superficiais por considerar o acumulado de precipitação para os últimos 12 meses.

A avaliação dos dados de água foi realizada através de análise exploratória de estatística descritiva e análises de correlação de Pearson. Também foi realizada análise de regressão linear simples, através do programa Statistica® (Statsoft Inc. 1996), usando os dados padronizados ( $\text{Log}_{10}(X)$ ). Também foi realizada a análise de componentes principais (ACP), através do

software PCord 6.0, para as variáveis limnológicas do reservatório, cujos dados foram padronizados pela transformação por  $\text{Log}_{10}(X)+1$ . Esta análise permitiu a observação das mudanças temporais nas condições químicas e físicas do ecossistema e reforçou a interação entre os parâmetros pluviométricos e os de qualidade da água.

### 3. RESULTADOS

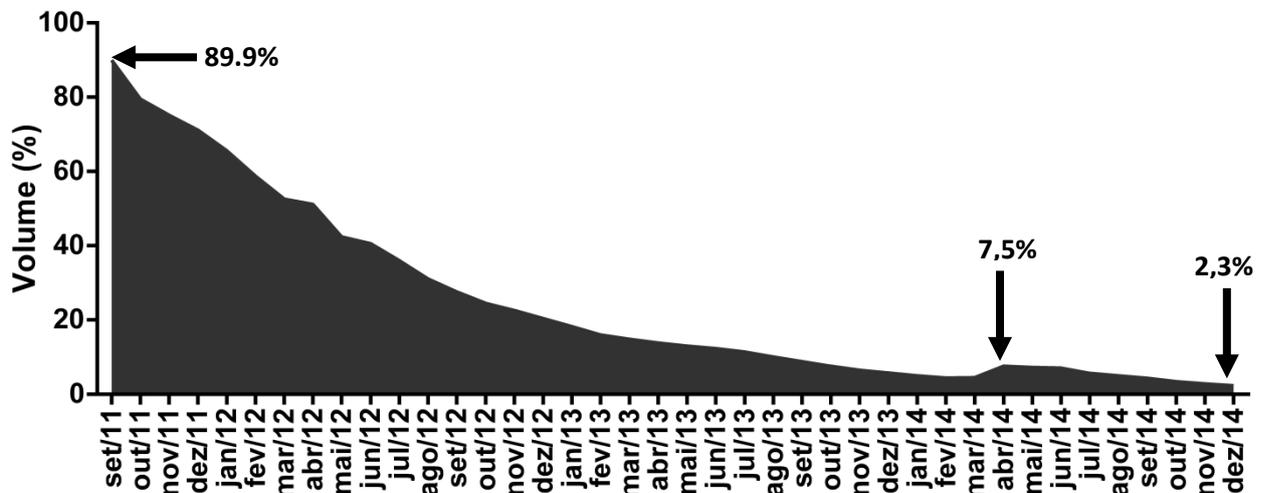
As precipitações ocorridas durante o período de estudo foram, em geral, menores do que os valores da série histórica obtida (de mais de 50 anos), e em apenas 4 meses a chuva ultrapassou os valores esperados de precipitações (Figura 3). Dos anos observados, 2012 apresentou um longo período de estiagem que se estendeu até 2013, o que fez com que as precipitações fossem abaixo da média ou inexistentes (Figura 3). No ano de 2014, as precipitações foram as mais próximas aos valores da série histórica, entretanto, em alguns meses, foram observadas precipitações abaixo dos valores previstos (Figura 3).



**Figura 3** – Valores das precipitações mensais acumuladas para o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014 do local de estudo, série histórica de precipitações mensais da região de 1963 a 2015 (Fonte: EMPARN), e índice SPI avaliado para a área de estudo a partir da variável SPI 12 (Fonte: INMET).

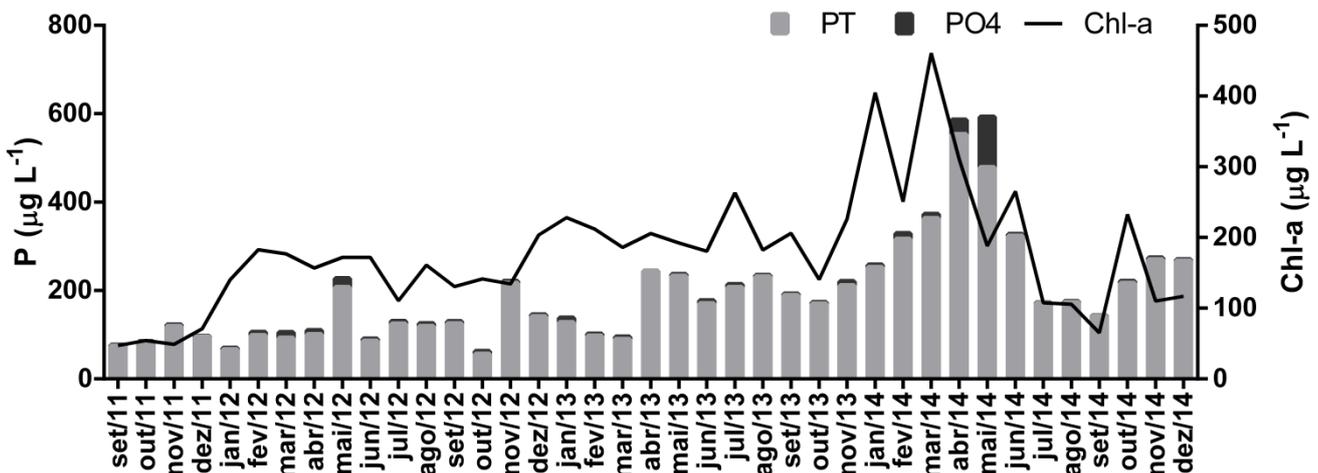
O volume acompanhou a escassez de chuvas, de maneira que reduziu continuamente até final do período estudado, havendo um pequeno acréscimo de volume armazenado, que coincidiu com o período chuvoso de 2014 ocorrido nos meses de março e abril (Figura 4). Em relação ao volume acumulado no reservatório, os maiores valores observados ocorreram no início do estudo, com o maior volume em setembro de 2011 (89,99%), entretanto o volume reduziu continuamente até o fim do período de estudo (Figura 4). Foi observado um pequeno crescimento do volume no mês de abril de 2014 (7,53%), porém, depois disso, o volume

continuou a decrescer, de forma que, em dezembro de 2014, o reservatório continha apenas 2,32% da sua capacidade total (Figura 4).



**Figura 4** - Variação volumétrica do reservatório Passagem das Traíras, em função da capacidade máxima de acumulação, para o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014.

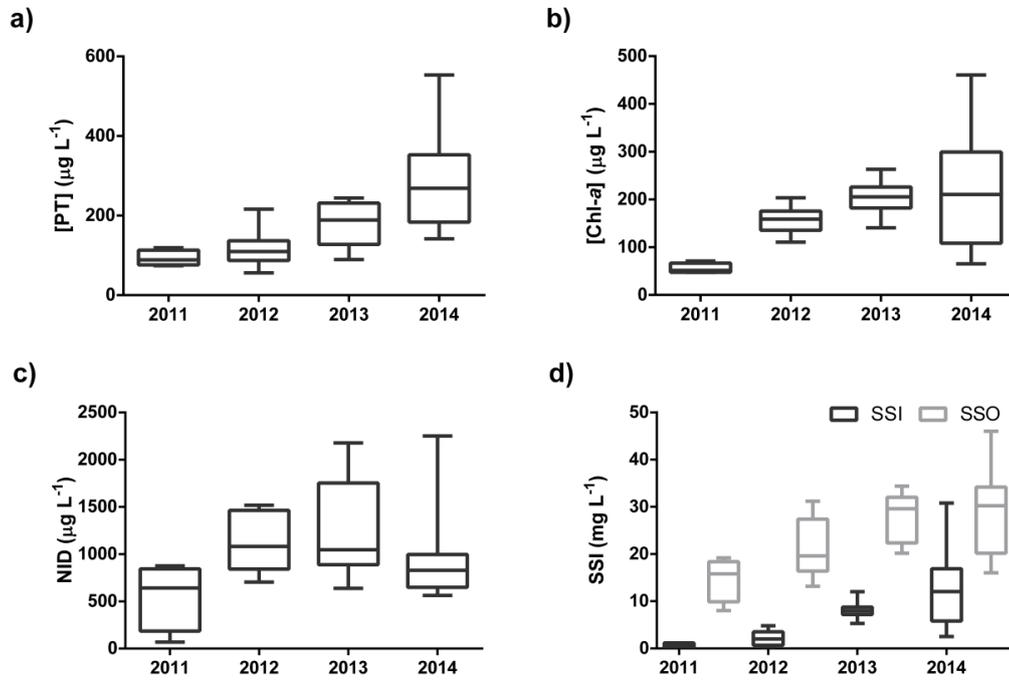
As concentrações de fósforo total aumentaram ao longo do tempo. As menores concentrações ocorreram no início do período de estudo (setembro de 2011 a março de 2013), mas, a partir de abril de 2013, as concentrações apresentaram valores próximos a  $200 \mu\text{g L}^{-1}$  (Figura 5). As maiores concentrações ocorreram nos meses de abril e maio de 2014, cujos valores foram iguais a  $553$  e  $478 \mu\text{g L}^{-1}$ , respectivamente (Figura 5).



**Figura 5** - Concentrações de fósforo total (PT), ortofosfato (PO4) e clorofila-a do reservatório Passagem das Traíras, para o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014.

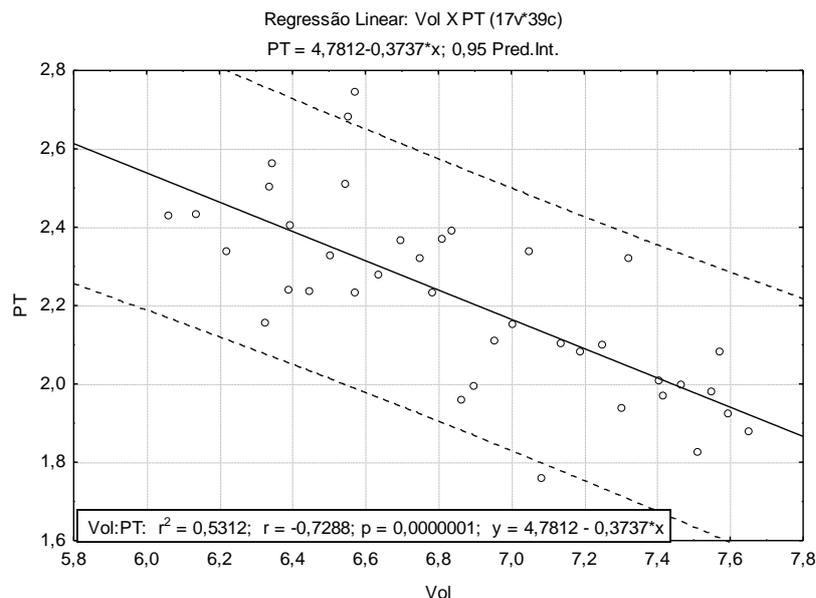
As concentrações de ortofosfato foram baixas durante quase todo o período de estudo, com máximos valores em abril ( $32,80 \mu\text{g L}^{-1}$ ) e maio ( $114,50 \mu\text{g L}^{-1}$ ) de 2014 (Figura 5). Para a clorofila-a, os valores apresentaram variações, tendo crescido a partir de janeiro de 2012 e picos nos meses de janeiro ( $404,80 \mu\text{g L}^{-1}$ ) e março ( $460,43 \mu\text{g L}^{-1}$ ) de 2014 (Figura 5).

As concentrações de fósforo total (PT), assim como de clorofila-*a* (Chl-*a*) e sólidos suspensos inorgânicos e orgânicos (SSI e SSO) aumentaram a cada ano, atingindo os maiores valores no ano de 2014 (Figura 6). As médias das concentrações de nitrogênio inorgânico dissolvido (NID) aumentaram até 2013, diminuindo no ano de 2014 (Figura 6).



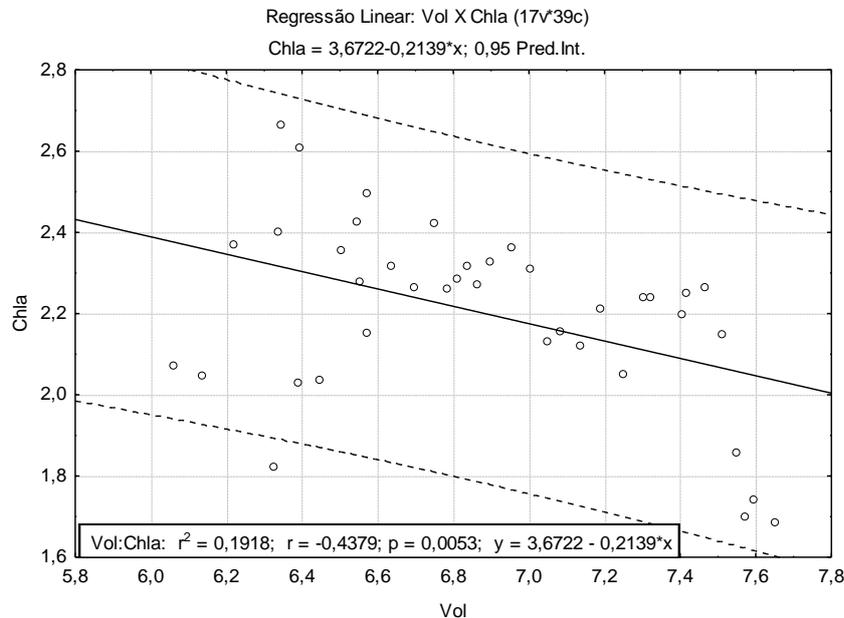
**Figura 6** – Valores de medianas das concentrações de: a) fósforo total (PT), b) clorofila-*a* (Chl-*a*), c) nitrogênio inorgânico dissolvido (NID = NH<sub>3</sub> + NO<sub>3</sub>), e d) sólidos em suspensão inorgânicos e orgânicos do reservatório passagem das Traíras, para os anos de 2011, 2012, 2013 e 2014.

A análise de regressão linear evidenciou uma relação inversamente proporcional entre o volume (Vol) e a concentração de fósforo total (PT). Essa relação foi significativa ( $p < 0,01$ ) e o volume explicou aproximadamente 73% dos dados de fósforo total (Figura 7).



**Figura 7** - Regressão linear entre os valores logaritmizados de volume (Vol) e fósforo total (PT) para o reservatório Passagem das Traíras.

Também observou-se uma relação inversamente proporcional entre o volume (Vol) e a concentração clorofila-*a* (Chla) através da análise de regressão linear, a qual foi significativa ( $p < 0,01$ ) e nela o volume explicou aproximadamente 44% dos dados de clorofila-*a* (Chla) (Figura 8).

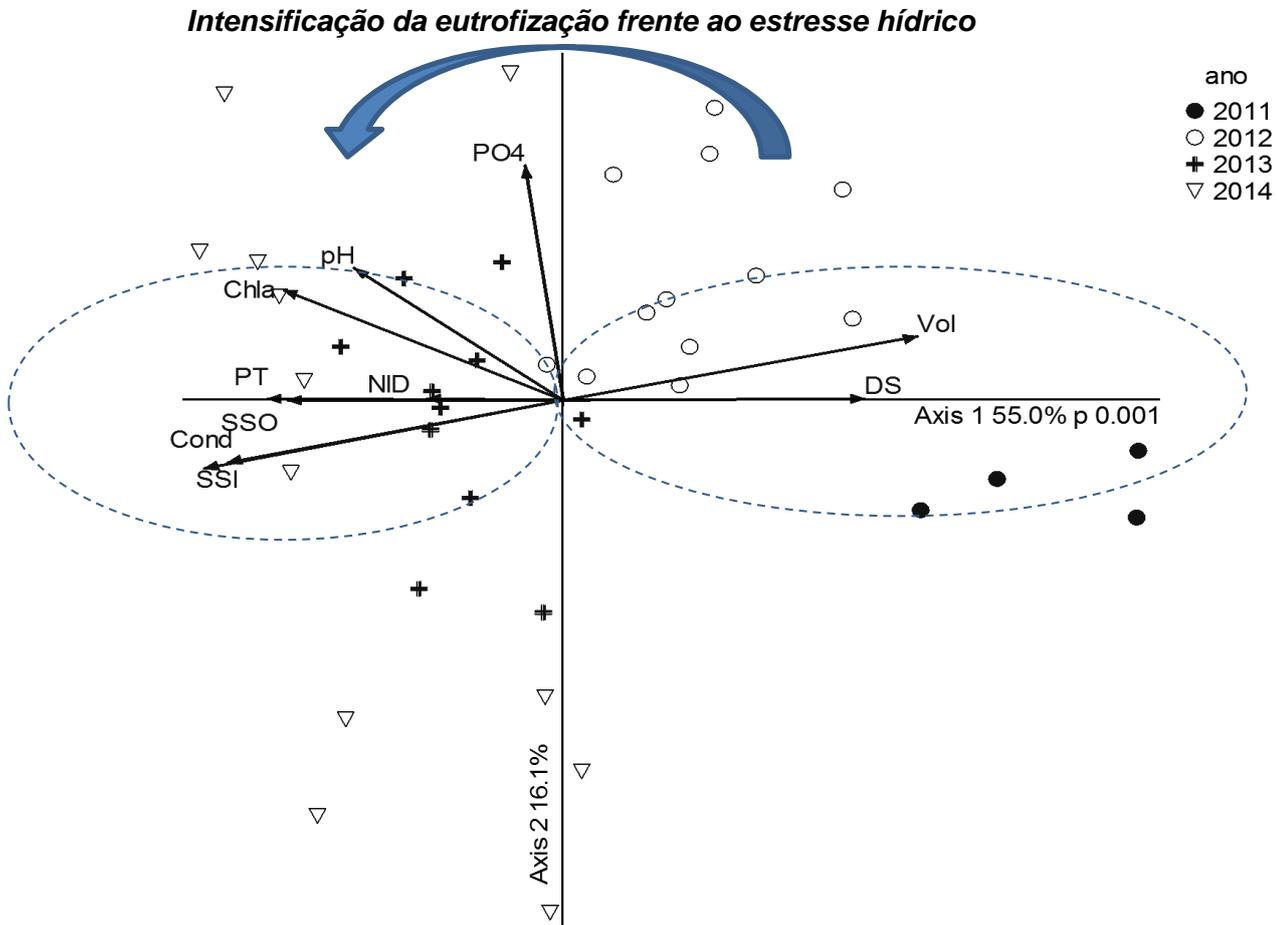


**Figura 8** - Regressão linear entre os valores logaritmizados de volume (Vol) e clorofila-*a* (Chla) para o reservatório Passagem das Traíras.

A análise de componentes principais (ACP), realizada utilizando 9 variáveis limnológicas e 1 variável morfométrica, explicou 71,1% dos dados nos primeiros dois eixos (eixo 1 = 55%; eixo 2 = 16,1%) (Figura 9). O eixo 1 esteve correlacionado com quase todas as variáveis analisadas: volume ( $r=0,87$ ), transparência da água ( $r=0,80$ ), condutividade elétrica ( $r=-0,87$ ), pH ( $r=-0,67$ ), sólidos suspensos inorgânicos ( $r=-0,85$ ), sólidos suspensos orgânicos ( $r=-0,80$ ), fósforo total ( $r=-0,77$ ), nitrogênio inorgânico dissolvido ( $r=-0,54$ ) e clorofila-*a* ( $r=-0,77$ ) (Figura 9). No eixo 2, apenas o ortofosfato foi correlacionado ( $r=0,75$ ) (Figura 9).

Essa análise também evidenciou a segregação das unidades amostrais em função de cada ano, evidenciando uma distinção entre os dados segundo um gradiente temporal e o evento extremo de seca, bem como seu efeito tardio (Figura 9). No lado positivo do eixo 1, as unidades amostrais do ano de 2011 ficaram mais bem relacionadas às variáveis volume (Vol) e transparência da água (DS) (Figura 9). No lado negativo do eixo 1, ficaram as unidades amostrais do ano 2013, as quais se relacionaram melhor com as variáveis fósforo total (PT), clorofila-*a* (Chla), pH, nitrogênio inorgânico dissolvido (NID), condutividade elétrica (Cond) e sólidos suspensos inorgânicos (SSI) e orgânicos (SSO) (Figura 9). As unidades amostrais de

2012 ficaram bem relacionadas com ortofosfato (PO4) e demonstraram uma transição entre os anos de 2011 e 2013 (Figura 9).



**Figura 9** - Análise de componentes principais das variáveis analisadas para o reservatório Passagem das Traíras, para o período de setembro de 2011 a dezembro de 2014.

Vol = volume; DS = transparência medida pelo disco de Secchi; PO4 = concentração de ortofosfato; pH = potencial hidrogeniônico; Chla = concentração de clorofila-*a*; PT = concentração de fósforo total; NID = concentração de nitrogênio inorgânico dissolvido, obtido através da soma das concentrações de nitrato (NO<sub>3</sub>) e amônia (NH<sub>3</sub>); SSO = concentração de sólidos suspensos orgânicos; SSI = concentração de sólidos suspensos inorgânicos; Cond = condutividade elétrica.

#### 4. DISCUSSÃO

Mudanças nas taxas de precipitação e evaporação, como consequências das mudanças climáticas, irão agravar os efeitos da eutrofização (Moss et al. 2011) e prevê-se que as regiões de clima mais seco serão mais sensíveis a essas mudanças (Dokulil 2015). A escassez hídrica acarreta na diminuição do nível de água que, associado com altas temperaturas e alto tempo de residência (Xu et al. 2011; Mosley 2015), intensifica a acumulação e concentrações de nutrientes, aumenta a condutividade e salinidade, resultando no agravamento da eutrofização e,

por conseguinte, na degradação da qualidade da água (Beklioglu & Tan 2008; Olds et al. 2011; Barbosa et al. 2012; Jeppesen et al. 2015).

As reduções volumétricas causadas por mudanças hidrológicas aumentam o tempo de retenção dos nutrientes no reservatório, modificando a dinâmica de nutrientes, aumentando sua concentração (Özen et al. 2010). Os nossos dados da análise de regressão linear confirmaram este padrão durante o evento de seca prolongada para o reservatório Passagem das Traíras. Além disso, a concentração de nutrientes em um menor volume aumenta a disponibilidade de nutrientes para a assimilação pelos produtores primários (Costa et al. 2016). Modificações na disponibilidade de nutrientes do sistema podem alterar não somente a qualidade da água, mas também a estrutura trófica do sistema, provocando seu desequilíbrio (Jeppesen et al. 2015).

No semiárido, a ocorrência de eventos extremos (chuvas intensas e seca severa) propicia altas e rápidas variações nos volumes armazenados nos reservatórios, além de modificar a qualidade da água (Medeiros et al. 2015). Estes impactos na qualidade da água foram reportados em outros reservatórios da região, especialmente devido às características hidrológicas do semiárido e à suscetibilidade ao regime climático (Brasil et al. 2015; Costa et al. 2016). Os resultados do presente estudo confirmaram este comportamento, no qual o manancial Passagem das Traíras enfrentou um evento de seca extrema que acarretou numa drástica redução de volume e na intensificação do processo de eutrofização.

A análise de componentes principais (ACP) reitera este padrão de respostas frente ao estresse hídrico causado pelo evento extremo de seca. Em Passagem das Traíras, verificamos que as unidades amostrais do ano de 2011 (meses após o período chuvoso) foram ordenadas com maior volume e transparência da água. As unidades amostrais dos anos 2013 e 2014 (período de seca) foram ordenadas com elevados valores de nutrientes, condutividade elétrica, pH, sólidos suspensos e clorofila-*a*, indicando um processo progressivo de eutrofização em virtude do período de seca prolongada.

Durante todo o período de estudo, o reservatório apresentou taxas de fósforo total e clorofila-*a* acima do limite para ser considerado eutrófico (fósforo total =  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ ; clorofila-*a* =  $15 \mu\text{g L}^{-1}$ ), de acordo com Thornton & Rast (1993), cujo estudo foi feito em ambientes tropicais semiáridos. Entretanto, nos anos de 2013 e 2014, as concentrações aumentaram, apresentando valores de fósforo e clorofila superiores a  $90 \mu\text{g L}^{-1}$  e  $65 \mu\text{g L}^{-1}$  respectivamente, o que indica um possível agravamento do estado trófico do sistema.

A seca ocorrida nos anos 2012 e 2013 no semiárido nordestino foi considerada a pior seca dos últimos 60 anos (Agência Nacional de Águas - ANA 2015). De acordo com os dados obtidos, o prolongamento da seca nesses anos reduziu tanto o volume do reservatório que,

mesmo com precipitações normais no ano de 2014, não houve aumento relevante no volume armazenado ou melhora na qualidade da água.

A redução significativa dos volumes de reservatórios do semiárido tem sido apresentada como um dos principais motivos das mudanças das variáveis limnológicas indicativas da qualidade da água dos mananciais tropicais semiáridos nestes últimos anos (Braga et al. 2015; Brasil et al. 2015; Medeiros et al. 2015; Costa et al. 2016). O mesmo foi verificado para o Reservatório Passagem das Traíras, que sofreu uma gradativa degradação da qualidade da água, em função da contínua redução volumétrica provocada pelo prolongamento da seca.

Além disso, em cenários de secas severas ou extremas no semiárido, podem ocorrer efeitos ainda mais graves para a qualidade da água. Em secas extremas, as altas temperaturas e a ausência de precipitação ocasionarão maiores reduções de volume e, por conseguinte, maiores concentrações de nutrientes, reduzindo a capacidade de retenção de nutrientes do sistema e acelerando o processo de eutrofização e seus efeitos, tais como as florações de cianobactérias (Özen et al. 2010; Eskinazi-Sant'Anna et al. 2013).

Dessa forma, no futuro, os mananciais superficiais serão mais sensíveis às cargas de nutrientes, devido ao aumento da temperatura provocado pelas mudanças climáticas, pois pequenas concentrações de nutrientes sob maiores temperaturas proporcionarão maior risco de florações de cianobactérias (Kosten et al. 2012; Nielsen et al. 2014). Assim, haverá alteração na dinâmica do sistema, principalmente quanto à ciclagem de nutrientes, acarretando em prejuízos de sua estética e dos usos múltiplos aos quais o manancial se destina (Carpenter et al. 1998; Jeppesen et al. 2014). Possíveis soluções para evitar isso seriam redução ou interrupção de entradas de carga de nutrientes (Nielsen et al. 2014) por meio de zoneamento de atividades realizadas próximos a mananciais e a manutenção da zona ripária (Reich & Lake 2015).

Neste sentido, o comportamento desses sistemas diante das secas extremas recorrentes na região semiárida, representam o cenário futuro de mudanças climáticas, cuja previsão é de eventos de seca mais intensos e frequentes para algumas partes do mundo, gerando maior estresse hídrico aos mananciais (IPCC 2014). Portanto, o estudo desses ambientes sob eventos extremos é necessário para uma melhor compreensão, gestão, manejo e possível adaptação às mudanças climáticas (Yihdego et al. 2015) por meio de implementação de medidas estruturantes, como a proteção dos mananciais e investimento em infraestrutura de esgotamento sanitário e drenagem.

Sumarizando, nosso trabalho evidenciou, em uma escala temporal, que reduções de volume de água em reservatórios da região semiárida promovem o aumento da concentração de sólidos suspensos, nutrientes e clorofila-*a*. Além disso, nossos dados demonstram a intensificação

do processo de eutrofização e, assim, a degradação da qualidade da água, em virtude dos eventos extremos de seca.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). Disponível em:

<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/12/comeca-a-construcao-do-plano-de-seguranca-hidrica>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2015.

<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/12/comeca-a-construcao-do-plano-de-seguranca-hidrica>. Accessed 20 Feb 2015

APHA (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Waste-water, 20<sup>a</sup> ed. Washington: APHA, AWWA and W.E.F, Washington, D. C.

Barbosa JEDL, Medeiros ESF, Brasil J, et al (2012) Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. *Acta Limnol Bras* 24:103–118. doi: 10.1590/S2179-975X2012005000030

Beklioglu M, Tan CO (2008) Restoration of a shallow Mediterranean Lake by biomanipulation complicated by drought. *Fundam Appl Limnol Arch für Hydrobiol* 171:105–118. doi: 10.1127/1863-9135/2008/0171-0105

Bertoni J, Lombardi Neto F (1990) Conservação do Solo. Ícone Editora, São Paulo

Beyhan M, Kaçikoç M (2014) Evaluation of Water Quality from the Perspective of Eutrophication in Lake Eğirdir, Turkey. *Water, Air, Soil Pollut* 225:1994. doi: 10.1007/s11270-014-1994-x

Bezerra Júnior JGO, Silva NM da. (2007) Caracterização geoambiental da microrregião do Seridó Oriental do Rio Grande do Norte. *Holos* 23:78–91.

Bouvy M, Falcão D, Marinho M, et al (2000) Occurrence of *Cylindrospermopsis* (Cyanobacteria) in 39 Brazilian tropical reservoirs during the 1998 drought. *Aquat Microb Ecol* 23:13–27. doi: 10.3354/ame023013

Bouvy M, Nascimento SM, Molica RJR, et al (2003) Limnological features in Tapacura reservoir (northeast Brazil) during a severe drought. *Hydrobiologia* 493:115–130.

Braga GG, Becker V, Oliveira JNP de., et al (2015) Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region. *Acta Limnol Bras* 27:15–23. doi: 10.1590/S2179-975X2214

Brasil J, Attayde JL, Vasconcelos FR, et al (2015) Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. *Hydrobiologia*. doi: 10.1007/s10750-015-2578-5

- Carpenter SR, Caraco NF, Correll DL, et al (1998) Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecol Appl* 8:559–568.
- Carvalho RP de., Daniel O, Davide AC, Souza FR de. (2015) Atributos físicos e químicos de um neossolo quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Rev Caatinga* 28:148–159.
- Costa MRA da., Attayde JL, Becker V (2016) Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes. *Hydrobiologia*. doi: 10.1007/s10750-015-2593-6
- Dokulil MT (2015) Climate impacts on ecohydrological processes in aquatic systems. *Ecohydrol Hydrobiol* 1-5:2015. doi: 10.1016/j.ecohyd.2015.08.001
- Eskinazi-Sant’Anna EM, Menezes R, Costa IS, et al (2013) Zooplankton assemblages in eutrophic reservoirs of the Brazilian semi-arid. *Braz J Biol* 73:37–52.
- Figueirêdo MCB De, Teixeira AS, Araújo LDFP, et al (2007) Evaluation of reservoirs environmental vulnerability to eutrophication. *Eng Sanit e Ambient* 12:399–409. doi: 10.1590/S1413-41522007000400006
- Freitas FRS, Righetto AM, Attayde JL (2011) Suspended solids and phosphorus load in a brazilian semi-arid reservoir. *Oecologia Aust* 15:655–665. doi: 10.4257/oeco.2011.1503.16
- Geraldes AM, Boavida MJ (2005) Seasonal water level fluctuations: Implications for reservoir limnology and management. *Lakes Reserv Res Manag* 10:59–69. doi: 10.1111/j.1440-1770.2005.00257.x
- Hayes NM, Vanni MJ, Horgan MJ, Renwick WH (2015) Climate and land use interactively affect lake phytoplankton nutrient limitation status. *Ecology* 96:392–402. doi: 10.1890/13-1840.1
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil) (INMET). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/indicePrecipitacaoPadronizada//>. Acesso em 24 de Abril de 2015
- IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32
- Jepersen AM, Christoffersen K (1988) Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. *Hydrobiologia* 109:445–454.

- Jeppesen E, Brucet S, Naselli-Flores L, et al (2015) Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. *Hydrobiologia* 750:201–227. doi: 10.1007/s10750-014-2169-x
- Jeppesen E, Meerhoff M, Davidson TA, et al (2014) Climate change impacts on lakes: An integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *J Limnol* 73:88–111. doi: 10.4081/jlimnol.2014.844
- Kosten S, Huszar VLM, Bécares E, et al (2012) Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. *Glob Chang Biol* 18:118–126. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02488.x
- Medeiros LDC, Mattos A, Lüring M, Becker V (2015) Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake. *Aquat Ecol* 49:293–307. doi: 10.1007/s10452-015-9524-5
- Mosley LM (2015) Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Rev* 140:203–214. doi: DOI 10.1016/j.earscirev.2014.11.010
- Moss B, Kosten S, Meerhoff M, et al (2011) Allied attack: climate change and eutrophication. *Inl Waters* 1:101–105.
- Murphy J, Riley JP (1962) A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in in Natural Waters. *Anal Chim Acta* 27:31–36.
- Nielsen A, Trolle D, Bjerring R, et al (2014) Effects of climate and nutrient load on the water quality of shallow lakes assessed through ensemble runs by PCLake. *Ecol Appl* 24:1926–1944.
- Nielsen A, Trolle D, Søndergaard M, et al (2012) Watershed land use effects on lake water quality in Denmark. *Ecol Appl* 22:1187–200.
- Olds BP, Peterson BC, Koupal KD, et al (2011) Water quality parameters of a Nebraska reservoir differ between drought and normal conditions. *Lake Reserv Manag* 27:229–234. doi: 10.1080/07438141.2011.601401
- Özen A, Karapınar B, Kucuk İ, et al (2010) Drought-induced changes in nutrient concentrations and retention in two shallow Mediterranean lakes subjected to different degrees of management. *Hydrobiologia* 646:61–72. doi: 10.1007/s10750-010-0179-x
- Reich P, Lake PS (2015) Extreme hydrological events and the ecological restoration of flowing waters. *Freshw Biol* 60:2639–2652. doi: 10.1111/fwb.12508
- Roland F, Huszar VLM, Farjalla VF, Enrich-Prast A, Amado AM, Ometto JPHB (2012) Climate change in Brazil: perspective on the biogeochemistry of inland waters. *Braz J Biol* 72:709–722.

- Santos JCN dos., Andrade EM de., Araújo Neto JR de., et al (2014a) Land use and trophic state dynamics in a tropical semi-arid reservoir. *Rev Ciência Agronômica* 45:35–44.
- Thornton JA, Rast W (1993) A test of hypotheses relating to the comparative limnology and assessment of eutrophication in semi-arid man-made lakes. In: Straskraba M, Tundise JG, Duncan A (eds) *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*. Kluwer Academic Publishers, London, pp 1–24
- Trolle D, Hamilton DP, Pilditch CA, et al (2011) Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management. *Environ Model Softw* 26:354–370. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.08.009
- Valderrama JC (1981) The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Mar Chem* 10:109–122. doi: 10.1016/0304-4203(81)90027-X
- Vidal TF, Neto JC (2014) Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* 18:402–407.
- Xu Y, Zhang M, Wang L, et al (2011) Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China. *Quat Int* 244:272–279. doi: DOI 10.1016/j.quaint.2011.01.019
- Yihdego Y, Webb JA, Leahy P (2015) Modelling of lake level under climate change conditions: Lake Purrumbete in southeastern Australia. *Environ Earth Sci* 73:3855–3872. doi: DOI 10.1007/s12665-014-3669-8
- Zhang Z, Chen X, Xu C-Y, et al (2015) Examining the influence of river–lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin. *J Hydrol* 522:510–521. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.008
- Zohary T, Ostrovsky I (2011) Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes. *Inl Waters* 1:47–59. doi: 10.5268/IW-1.1.406

## CAPÍTULO 2

### USO E OCUPAÇÃO ALTERAM ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DO SOLO E FAVORECE A POLUIÇÃO DIFUSA PARA UM RESERVATÓRIO TROPICAL DO SEMIÁRIDO

#### RESUMO

O uso e ocupação da bacia hidrográfica alteram a configuração da paisagem e dos elementos contidos nela. Atividades antropogênicas podem mudar as propriedades do solo e degradam sua qualidade ambiental, tanto pelo aumento do teor de nutrientes, quanto pela erosão do solo. Entretanto, o solo consiste num sistema aberto, havendo interação entre os ambientes terrestres e aquáticos e transferência dos prejuízos ambientais para as águas por meio da poluição difusa. A erosão em uma bacia aumenta o carreamento e o aporte de sedimento e nutriente aos corpos hídricos, ocasionando ou intensificando a eutrofização, prejudicando a qualidade da água desses sistemas. A região semiárida possui solos naturalmente frágeis e geralmente bastante suscetíveis à erosão, de modo que mudanças nesses solos podem exacerbar a erosão, resultando em consequências mais graves para os corpos aquáticos regionais. Este trabalho teve como objetivo testar se o uso e ocupação realizados em uma bacia de um manancial de abastecimento do semiárido alteram a qualidade do solo e se favorecem a eutrofização do reservatório por meio da poluição difusa. Para isso, foram realizadas análises de geoprocessamento, a fim de descrever as características da bacia, bem como identificar atividades antrópicas nela realizadas (classificação supervisionada). Além disso, avaliou-se a qualidade ambiental do solo antropizado por meio da comparação dos atributos físicos e químicos dos solos alterados e de um solo sob mata nativa (não antropizado). Por fim, foi calculada a erosão para a quantificação da contribuição das atividades humanas para poluição difusa e o processo de eutrofização do reservatório. Através da análise de geoprocessamento, foram encontradas as seguintes classes de uso e cobertura do solo: água, caatinga densa, solo exposto, urbano, agricultura, pecuária e mineração. Os dados de atributos físicos e químicos do solo indicam que as classes de uso de agricultura, adubação orgânica e pecuária degradam a qualidade do solo. Em relação à erosão, os resultados obtidos apontam maior perda de solo para as áreas com adubação orgânica e pecuária, principalmente para a pecuária. Além de maior erosão, o solo sob pecuária apresentou os maiores teores de nitrogênio e fósforo, configurando um maior potencial de poluição difusa de nutrientes, contribuindo grandemente para o processo de eutrofização dos mananciais superficiais. Desse modo, este trabalho demonstra os efeitos negativos do uso e ocupação do solo sobre a qualidade do solo, favorecendo a degradação da qualidade das águas superficiais.

**Palavras-chave:** Atividades antrópicas, qualidade do solo, erosão hídrica, classificação supervisionada.

## CHAPTER 2

### LAND USE: CHANGE OF SOIL PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES AND DIFFUSE POLLUTION TO A SEMIARID TROPICAL RESERVOIR

#### ABSTRACT

The drainage basin use and occupation alters the landscape and its elements configuration. Anthropogenic activities change soil properties and degrade its environmental quality, both by increasing the nutrient content and by the soil erosion process. However, the soil is an open system, and there is an interaction between the terrestrial and aquatic environments and a transfer of environmental damage to the waters by the diffuse pollution. The erosion process in a basin increases the nutrients and sediment carrying and input to the waterbodies, causing or intensifying the eutrophication process, harming the water quality of these systems. The semiarid region has naturally fragile soil, that are quite susceptible to erosion, so that changes in these soils can exacerbate erosion, resulting in severe consequences to the regional waterbodies. This study aimed to test whether the land use and occupation forms carried out in a semiarid water supply basin alter the soil quality and whether these uses favor the reservoir eutrophication by diffuse pollution. For this, GIS analysis were performed in order to describe the basin features, as well as identify the existing human activities (supervised classification). Moreover, the soil environmental quality of the anthropic soil was analyzed by comparison of the physical and chemical attributes between the altered soils and a soil under native forest (not anthropic). Finally, the erosion was calculated to quantify the human activities contribution to diffuse pollution and the reservoir eutrophication process. Through GIS analysis, we found the following classes of land use and soil cover: water, dense white forest “caatinga”, exposed soil, urban, agriculture, livestock and mining. The physical and chemical attributes data indicate that agriculture, organic fertilizer and livestock classes of use degrade soil quality. In relation to the erosion, the results showed a bigger soil loss to the areas with organic fertilizer and livestock, especially for livestock. Besides the biggest erosion, the livestock had the highest nitrogen and phosphorus contents, resulting in a bigger nutrient diffuse pollution potential, contributing greatly to superficial waterbodies’ eutrophication process. Therefore, this study demonstrates the negatives effects of land use and occupation on the soil quality, promoting the degradation of superficial waters.

**Key-words:** Anthropic activities, soil quality, water erosion, supervised classification.

## 1. INTRODUÇÃO

A antropização do ambiente pode alterar não somente a configuração da paisagem (Wen et al. 2011), mas também as características e qualidade de seus componentes. Uso e ocupação do solo, bem como modificações na cobertura vegetal, implicam na alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, as quais acarretam na redução de sua qualidade (Islam & Weil 2000; Guo et al. 2015). Atividades humanas, como desmatamento e agricultura, provocam perdas significativas nas propriedades do solo, como o aumento do grau de compactação superficial do solo, redução da taxa de infiltração, elevação da densidade aparente, perda de porosidade, redução da estabilidade de agregados (Islam & Weil 2000), além do aumento da erodibilidade e do teor de nutrientes.

Tais modificações afetam diretamente a qualidade do solo, que consiste na capacidade do solo de exercer suas funções ecossistêmicas, como o sustento da produtividade biológica, manutenção e melhora da qualidade ambiental, além de influenciar na saúde da cobertura vegetal, de animais e humana (Doran & Parkin 1994). A mensuração da perda de qualidade do solo pode ser feita através da análise comparativa dos atributos físicos e químicos do solo sob usos antrópicos, tendo como referência a qualidade do solo sob mata nativa.

Entretanto, as consequências de alterações do uso da terra não se restringem ao solo, podendo ser estendidas também para os ambientes aquáticos, sejam as águas superficiais ou subterrâneas (Mouri 2015). Isso se deve ao fato do solo ser um sistema aberto, havendo a veiculação hídrica estimulada pelas interações do ciclo hidrológico que ocorrem na bacia de drenagem. A bacia integra os fatores geomorfológicos e socioeconômicos (Barbosa et al. 2012), de modo que a qualidade dos sistemas aquáticos continentais é controlada não só pela variação climática ou hidrológica, mas principalmente pelos processos biogeoquímicos e influência antropogênica (Mosley 2015).

Mudanças no uso e ocupação do solo de bacias hidrográfica contribuem para variações na taxa de escoamento superficial, no transporte de sedimentos e no fluxo de nutrientes para corpos hídricos (Ismail & Najib 2011). O aumento do escoamento superficial favorece maior erosão do solo e, assim, maior entrada de sedimento e nutrientes, intensificando os processos de assoreamento e eutrofização dos corpos aquáticos, sobretudo os superficiais (Mouri et al. 2011).

Em ambientes semiáridos, essas alterações tem maiores proporções, devido à fragilidade ambiental proporcionada pelas condições climáticas desses locais, como o baixo índice pluviométrico que conta com chuvas curtas, intensas e bastante variáveis, ocorrendo em variadas escalas temporais e espaciais (Barbosa et al. 2012). A escassez de água acarreta no

prejuízo do processo pedogenético por intemperismo químico, prevalecendo o processo físico, decorrendo na lenta formação dos solos.

Por essa razão, os solos são geralmente rasos e bastante suscetíveis à erosão, fazendo com que a perda de solos seja frequente na região semiárida (Pereira & Dantas Neto 2014). Além disso, a vegetação local (a caatinga) é geralmente escassa e rala, de forma que não consegue conter a erosão do solo (Barbosa et al. 2012). Desse modo, o prejuízo da qualidade do solo pode resultar em taxas de erosão ainda maiores, com maior risco de poluição difusa.

Diversos trabalhos realizados através de monitoramento de mananciais, tropicais ou temperados, e mapeamento por sensoriamento remoto da bacia hidrográfica comprovam que a concentração de nutrientes (Nielsen et al. 2012; Xie et al. 2014), matéria orgânica e sólidos suspensos (Thothong et al. 2011), qualidade da água (Von Sperling 2005; Leigh et al. 2010), estrutura fitoplanctônica (Katsiapi et al. 2012) e assoreamento de corpos hídricos (Thothong et al. 2011) possuem relação significativa com os usos e ocupação do solo da bacia.

Assim, a investigação das atividades desenvolvidas em bacias hidrográficas de mananciais de abastecimento humano é essencial para garantir a qualidade ambiental do solo e, por conseguinte, a preservação do manancial e sua utilidade (Liu et al. 2007). Nesse contexto, o geoprocessamento pode ser uma ferramenta útil no manejo da bacia e tem sido utilizado juntamente com modelagem para auxiliar na tomada de decisões para preservação dos recursos hídricos (Mouri 2015). As imagens de satélite podem ser usadas para identificação do uso e ocupação do solo, assim como áreas suscetíveis à erosão e fluxo de sedimentos (Kovacs et al. 2012).

O objetivo deste trabalho foi testar se o uso e ocupação do solo exerce influência sobre a qualidade do solo. Isso foi feito por meio da investigação das atividades exercidas na bacia de drenagem por meio de análise de geoprocessamento, bem como do estudo das alterações provocadas nos atributos físicos e químicos do solo. Além disso, a erosão do solo foi quantificada visando a determinação da real contribuição dos usos antropogênicos para os mananciais superficiais por poluição difusa e a identificação do uso que proporciona o maior risco de prejuízo da qualidade da água no corpo aquático.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1. Avaliação por meio de geoprocessamento e mapeamento da bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras**

A rede de drenagem da bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras foi delimitada através do programa QGIS e do complemento TauDEM, fazendo uso do *raster*

SRTM da área, fornecido gratuitamente pelo Earth Explorer. A delimitação da área de contribuição foi importante para definir a área de estudo a ser analisada e determinação da configuração dos canais de fluxo de drenagem, possibilitando o cálculo da quantidade de solo erodida e estimativa da contribuição da bacia para o carreamento de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio ao reservatório.

Além disso, foi feito o mapa de solo, que evidenciou os tipos de solos existentes na bacia. Esse mapa foi elaborado com uso do programa QGIS (versão 2.8, de 64 bits) e o shape do banco virtual de dados geográficos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE 2015).

Para a análise das formas de uso e ocupação do solo existentes na bacia de drenagem estudada, foi feita a classificação supervisionada das imagens de duas cenas do LANDSAT 8, as quais foram cedidas pela USGS (United States Geological Survey). Os dados das imagens utilizadas estão relacionados na Tabela 1. O processo de classificação supervisionada da imagem foi feito no programa MultiSpec (versão 2.12.2015 de 32 bits), com um total de 94 campos de treinamento. A montagem do mapa foi feita no QGIS (versão 2.8 de 64 bits).

**Tabela 1-** Dados das duas cenas cedidas pela instituição United States Geological Survey.

<b>Cena 1 - 215064</b>			<b>Cena 2 - 215065</b>		
<i>Dados</i>			<i>Dados</i>		
<b>Código</b>	LC8-215.064.2015.014 LGN		<b>Código</b>	LC8-215.065.2015.014 LGN	
<b>Data de aquisição</b>	10/05/2015		<b>Data de aquisição</b>	10/05/2015	
<b>Data da imagem</b>	14/01/2015 - 12:34:53		<b>Data da imagem</b>	14/01/2015 - 12:35:17	
<b>Índice de nuvens</b>	14,82%		<b>Índice de nuvens</b>	1,37%	
<b>Datum</b>	UTM / WGS84 124S		<b>Datum</b>	UTM / WGS84 124S	
<i>Delimitação</i>			<i>Delimitação</i>		
<b>Vértices</b>	Latitude	Longitude	<b>Vértices</b>	Latitude	Longitude
<b>UL</b>	-4,73721	-37,48436	<b>UL</b>	-6,18133	-37,79791
<b>UR</b>	-4,72962	-35,42246	<b>UR</b>	-6,17264	-35,73060
<b>LL</b>	-6,84789	-37,47872	<b>LL</b>	-8,29488	-37,79230
<b>LL</b>	-6,83689	-35,40918	<b>LL</b>	-8,28318	-35,71538

Vale salientar que a área de estudo estava inserida quase totalmente na cena 2 - 215065, cujo índice de nuvens era igual a 1,37% (Tabela 1), o que indica que os possíveis erros causados pelas reflectâncias de nuvens sobre a classificação supervisionada pela interpretação do programa MultiSpec podem ser desprezados.

Através do mapa de uso e ocupação, foi possível discernir quais atividades antrópicas oferecem maior risco de aporte de nutrientes ao manancial Passagem das Traíras e perda de qualidade da água desse sistema, tanto pela proximidade, quanto pelo total de área destinada a cada atividade antrópica. A visita em campo realizada para a coleta de solos auxiliou na

interpretação e identificação das feições, bem como confirmação das formas de uso e ocupação existentes na bacia.

## 2.2. Análise dos atributos físicos e químicos do solo

Foi realizada uma visita a campo, que permitiu encontrar áreas destinadas à agricultura e à pecuária, que são as principais atividades econômicas da região (IDEMA 2008). Além disso, foram encontradas áreas de solo sob mata nativa (caatinga) e de solo sob adubação orgânica, a qual estava sendo usada para os campos de cultura selecionados para estudo. A área de mata nativa foi selecionada como classe de referência de qualidade ambiental do solo, servindo como meio de distinção entre os solos antropizados e o solo sem interferência de atividades humanas. Desse modo, as classes de uso e ocupação escolhidas foram: mata nativa (MN), agricultura (AGR), adubação orgânica (AO) e pecuária (PEC). As áreas foram delimitadas de maneira que fossem representativas em relação a cada classe para coleta de amostras de solo.

Para cada ponto de coleta selecionado, foram retiradas amostras compostas deformadas, formadas pela mistura de cinco amostras simples cada, coletadas em caminhos percorridos aleatoriamente e em zig-zag, na profundidade de 0 a 20 cm, com quatro repetições para cada área. O solo coletado foi seco ao ar, posteriormente destorroado e passado na peneira de 2 mm de abertura de malha, para separação da terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras foram armazenadas em sacos plásticos com lacre, identificadas e mantidas em temperatura ambiente para posterior análise em laboratório.

Para avaliar a qualidade do solo, foram realizadas análises dos seguintes atributos físicos, de acordo com métodos preconizados pela EMBRAPA (1997): granulometria (método da pipeta), classificação textural (Diagrama Triangular simplificado), densidade do solo ( $D_s$ ) (método da proveta) e densidade de partículas ( $D_p$ ) (método do balão volumétrico) (EMBRAPA 1997). A porosidade total (PT) do solo foi estimada pela equação:  $Pt = [1 - (D_s/D_p)] \times 100$  (EMBRAPA 1999).

Quanto aos atributos químicos, as variáveis estudadas foram: pH em água na proporção 1:2,5;  $K^+$  e  $Na^+$  trocáveis por fotometria de emissão de chama após extração com extrator Mehlich-1;  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  trocáveis por espectrofotometria de absorção atômica, acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ) por titulação após extração com solução de acetato de cálcio a 0,5mol/L, fósforo disponível por colorimetria após extração com extrator Mehlich-1 e nitrogênio total pela técnica Kjeldahl por destilação a vapor (EMBRAPA 1999). A condutividade elétrica foi medida diretamente a partir de um condutivímetro (modelo Hanna HI 8732N), com solo em água na proporção 10 g de solo para 20 mL de água. Com os resultados obtidos do complexo sortivo,

foram calculados: soma de bases, capacidade de troca catiônica, saturação por bases e por sódio. O teor de matéria orgânica foi obtido por meio do método da calcinação (Davies 1974).

### 2.3. Cálculo da erosão do solo e da exportação de matéria orgânica e nutrientes para o reservatório

A erosão do solo foi determinada pela Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) (equação 1) de Wischmeier & Smith (1978). Essa quantificação foi necessária para encontrar a quantidade solo, bem como de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio que é carregada para o reservatório pela erosão hídrica.

$$A = R.K.LS.C.P \quad \text{(equação 1)}$$

Onde:

A = perda de solo por unidade de área ( $t.ha^{-1}ano^{-1}$ );

R = erosividade da chuva ( $MJ.mm.ha^{-1}.h^{-1}ano^{-1}$ );

K = erodibilidade do solo ( $t.ha^{-1}.MJ.mm.ha^{-1} h_1$ );

LS = fator para o efeito combinado do declive e do comprimento da rampa (adimensional);

C = fator cobertura e manejo do solo (adimensional);

P = fator práticas conservacionistas (adimensional).

A erosividade da chuva (R) foi mensurada através do somatório do índice de erosão média mensal ( $EI_m$ ) (equação 2). O índice  $EI_m$  foi calculado para toda área da bacia e para cada mês, por meio da equação 3, de Lombardi Neto & Moldenhauer (1992). Nessa equação, p é a precipitação média mensal (mm) e P é a precipitação média anual (mm), ambas conseguidas por meio de uma série histórica de mais de 50 anos (de 1963 a 2015), cujos dados foram fornecidos pela EMPARN.

$$R = \sum_{i=1}^{12} EI_m \quad \text{(equação 2)}$$

$$EI_m = 68,730.(p^2/P)^{0,841} \quad \text{(equação 3)}$$

A erodibilidade do solo (K) foi determinada por meio da equação que rege o nomograma de Wischmeier & Smith (1978) (equação 4). As informações necessárias para o cálculo de K foram obtidas a partir da análise de granulometria e de teor de matéria orgânica do solo, bem como da classificação do solo com base na literatura pedológica e da categorização do solo com base em Wischmeier & Smith (1978). A variável K foi determinada para cada classe de uso e ocupação encontrada em campo: mata nativa (MN), agricultura (AGR), adubação orgânica (AO) e pecuária (PEC).

$$K = [2,1 M^{1,14} 10^{-4} (12 - a) + 3,25 (b - 2) + 2,5(c - 3)] / 100 \quad \text{(equação 4)}$$

Onde:

M = (% silte + % areia muito fina)\*(100 - % argila);

a = % de matéria orgânica do solo;

b = classe de estrutura do solo (Wischmeier & Smith 1978);

c = classe de permeabilidade do solo (Wischmeier & Smith 1978).

O fator de declive e comprimento de rampa (LS) foi calculado por meio da equação 5, de Bertoni & Lombardi Neto (1990). Esse fator foi calculado para cada ponto de coleta de todas as classes achadas em campo (MN, AGR, AO e PEC).

$$LS = 0,00984 \cdot L^{0,63} \cdot S^{1,18} \quad (\text{equação 5})$$

Onde:

L = Distância de escoamento superficial em cada área (m);

S = Declividade do terreno em cada área (%).

Para encontrar a distância de escoamento superficial (L), foi utilizada a ferramenta Perfil de Elevação do programa Google Earth Pro, assim como os dados de coordenadas geográficas de cada ponto (Tabela 2) e o mapa de drenagem obtido pela análise da bacia por meio do geoprocessamento (Vide itens 2.1 e 3.1). A partir desse software, também foram retirados os dados de altimetria para cálculo da declividade do terreno (S), a qual foi calculada através da equação 6.

$$S_{(\%)} = [(C_M - C_m) / L_{esc}] 100 \quad (\text{equação 6})$$

Onde:

CM = Cota de maior altimetria (m);

Cm = Cota de menor altimetria (m);

L<sub>esc</sub> = Distância ao longo da qual se processa o escoamento superficial (m).

**Tabela 2** - Coordenadas geográficas do ponto de coleta de água no reservatório Passagem das Traíras e de cada ponto de amostragem de solo feita em campo.

Ponto	Latitude	Longitude
<b>P1 – coleta de água no reservatório</b>	06°30'47" S	36°56'14" W
<b>AGR 1</b>	06°30'51,52" S	36°56'15,23" W
<b>AGR 2</b>	06°30'52,84" S	36°56'18,59" W
<b>AGR 3</b>	06°30'53,92" S	36°56'21,08" W
<b>AGR 4</b>	06°30'55,62" S	36°56'21,18" W
<b>AO 1</b>	06°30'56,14" S	36°56'25,94" W
<b>AO 2</b>	06°30'55,98" S	36°56'27,48" W
<b>AO 3</b>	06°30'57,03" S	36°56'26,52" W
<b>AO 4</b>	06°30'57,2" S	36°56'27,99" W
<b>PEC 1</b>	06°31'2,46" S	36°56'16,71" W
<b>PEC 2</b>	06°31'3,03" S	36°56'16,46" W
<b>PEC 3</b>	06°31'2,66" S	36°56'17,47" W
<b>PEC 4</b>	06°31'1,72" S	36°56'17,09" W
<b>MN 1</b>	06°31'10,59" S	36°56'30,48" W
<b>MN 2</b>	06°31'11,31" S	36°56'30,86" W
<b>MN 3</b>	06°31'10,77" S	36°56'31,72" W
<b>MN 4</b>	06°31'11,84" S	36°56'31,49" W

O fator de cobertura e manejo do solo (C) foi determinado de acordo com as características das áreas de cada classe encontradas em campo. Para a mata nativa (MN) de caatinga teve C igual a 0,0167 (Santos et al. 2014b) e para a agricultura C foi igual a 0,018 (Farinasso et al. 2006). Nos pontos de coleta de adubação orgânica (AO) e pecuária (PEC), não havia qualquer forma de cobertura de solo, de modo que foi adotado o valor máximo (1) de acordo com Wischmeier & Smith (1978).

Os valores dos fatores de práticas conservacionistas (P) foram determinados com base no método de Wischmeier & Smith (1978). Foi observada a ausência de quaisquer práticas de conservação em todas as áreas avaliadas durante a amostragem em campo, sendo atribuído o valor máximo para todas as classes de uso e ocupação, inclusive a mata nativa. Na Tabela 3, estão descritos os valores médios finais calculados para cada fator para todas as classes observadas em campo.

**Tabela 3** - Valores dos fatores da Equação Universal de Perdas de Solo para obtenção do valor de solo erodido, de acordo com as classes de uso e ocupação definidas em campo.

<b>Classe de Uso e Ocupação</b>	<b>R</b>	<b>K</b>	<b>LS</b>	<b>C</b>	<b>P</b>
<b>AGR</b>	4090,08	0,35	0,51	0,0180	1,00
<b>AO</b>	4090,08	0,16	0,68	1,0000	1,00
<b>PEC</b>	4090,08	0,08	2,39	1,0000	1,00
<b>MN</b>	4090,08	0,32	1,56	0,0167	1,00

Por fim, as quantidades de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio perdida do solo por erosão hídrica para cada área foram estimadas a partir do produto entre os teores disponíveis desses atributos na camada superficial do solo propensa à erosão (profundidade até 20 cm) conforme item 2.2 e 3.2, e a quantidade de solo erodida (obtida pela equação universal de perdas de solo), conforme item 3.3.

#### **2.4. Análises estatísticas dos dados**

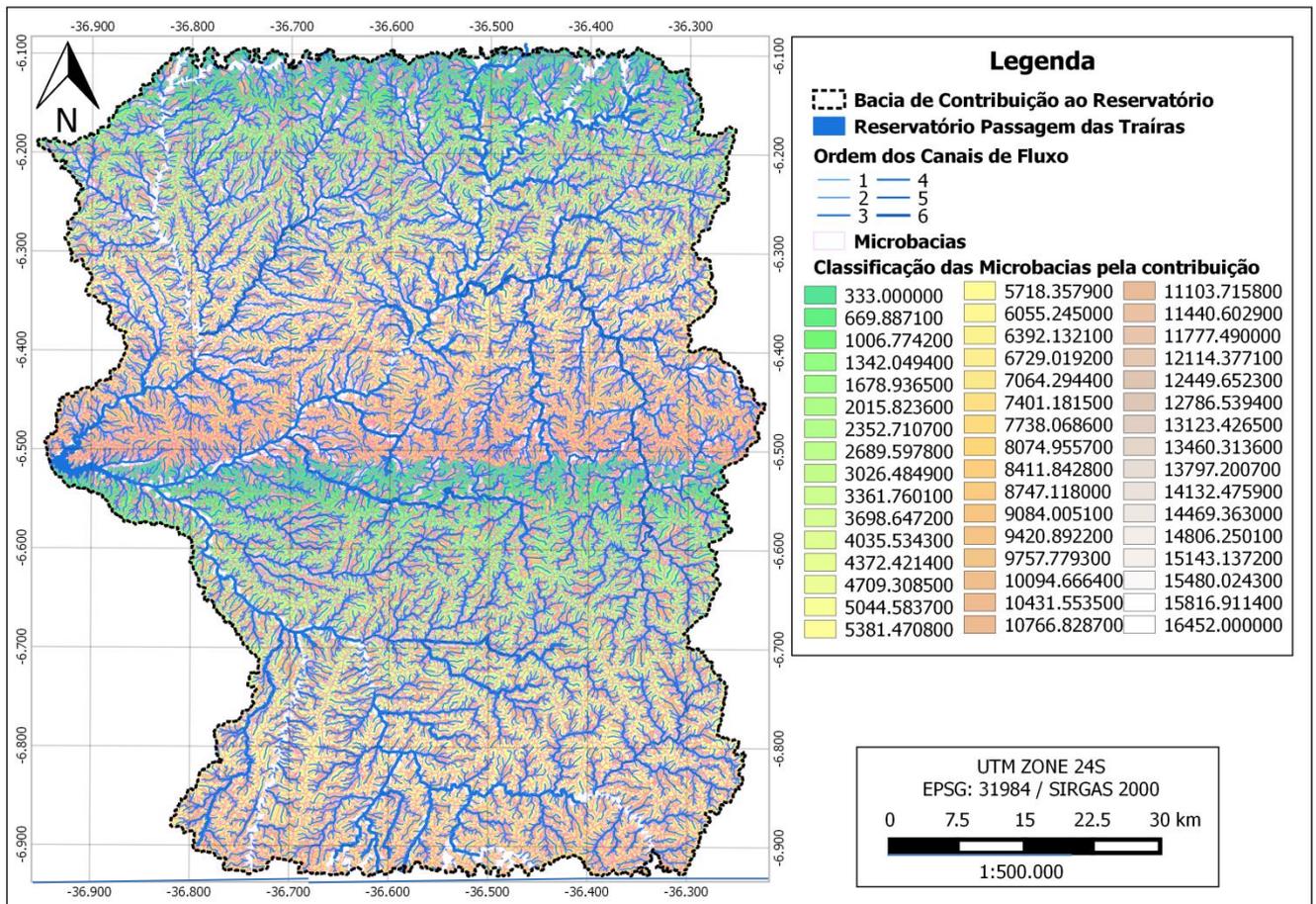
A avaliação dos dados de solo foi feita através de análises exploratórias de estatística descritiva, análises de correlação de Pearson e Teste de Tukey. Essas análises permitiram a quantificação das alterações sofridas, bem como a identificação de relações entre os atributos estudados e a comparação entre os efeitos exercidos pelos usos antrópicos e o solo não alterado. Para esses estudos estatísticos, foi usado o programa SAS (Statistical Analysis System, versão 8). Foi realizada uma análise de componentes principais (ACP) com o software PCord 6.0 para os atributos físicos e químicos do solo da bacia, a fim determinar as relações entre as mudanças

provocadas no solo e as classes de uso e ocupação observadas em campo (MN, AGR, AO e PEC). Para esta análise os dados foram padronizados por meio da transformação logarítmica de  $\text{Log}_{10}(X)+1$ .

### 3. RESULTADOS

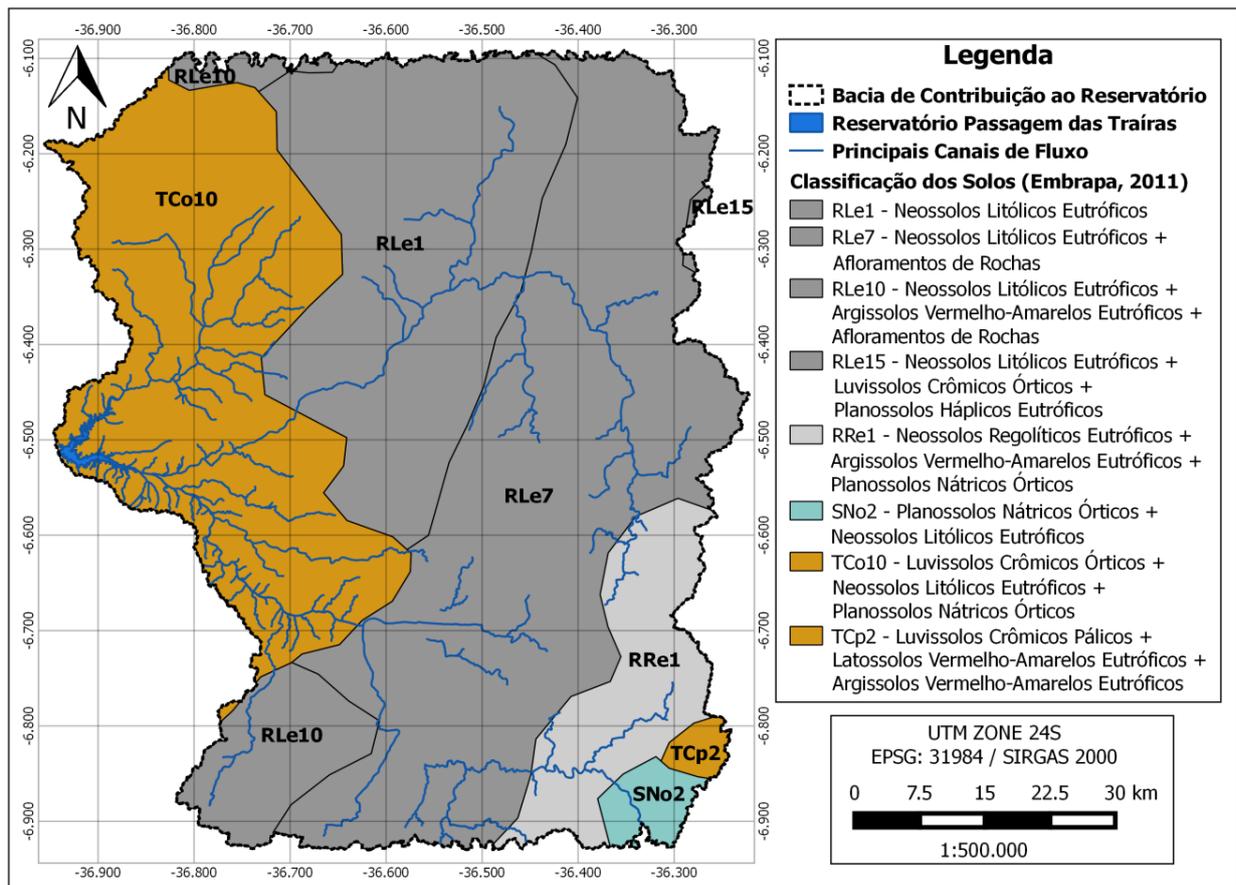
#### 3.1. Análise de geoprocessamento dos atributos da bacia de drenagem do reservatório Passagem das Traíras

Através de análise de geoprocessamento, obteve-se o mapa de drenagem que delimita a bacia de contribuição ao reservatório (Figura 10). Essa delimitação foi importante para delimitar o espaço de estudo e identificar as características inseridas nele. A partir da delimitação da área de drenagem contribuinte ao reservatório, foi possível confeccionar demais mapas segundo os limites da bacia. Além disso, a definição da rede de drenagem foi necessária para obtenção do fator LS, que é usado na estimativa da quantidade de solo erodia (Vide item 2.3).



**Figura 10** - Mapa de delimitação da bacia de drenagem e das contribuições de fluxo ao Reservatório Passagem das Traíras (Fonte: a autora).

O mapa de solos exibiu a predominância de solos jovens na bacia de drenagem estudada, como os luvisolos e neossolos (Figura 11).



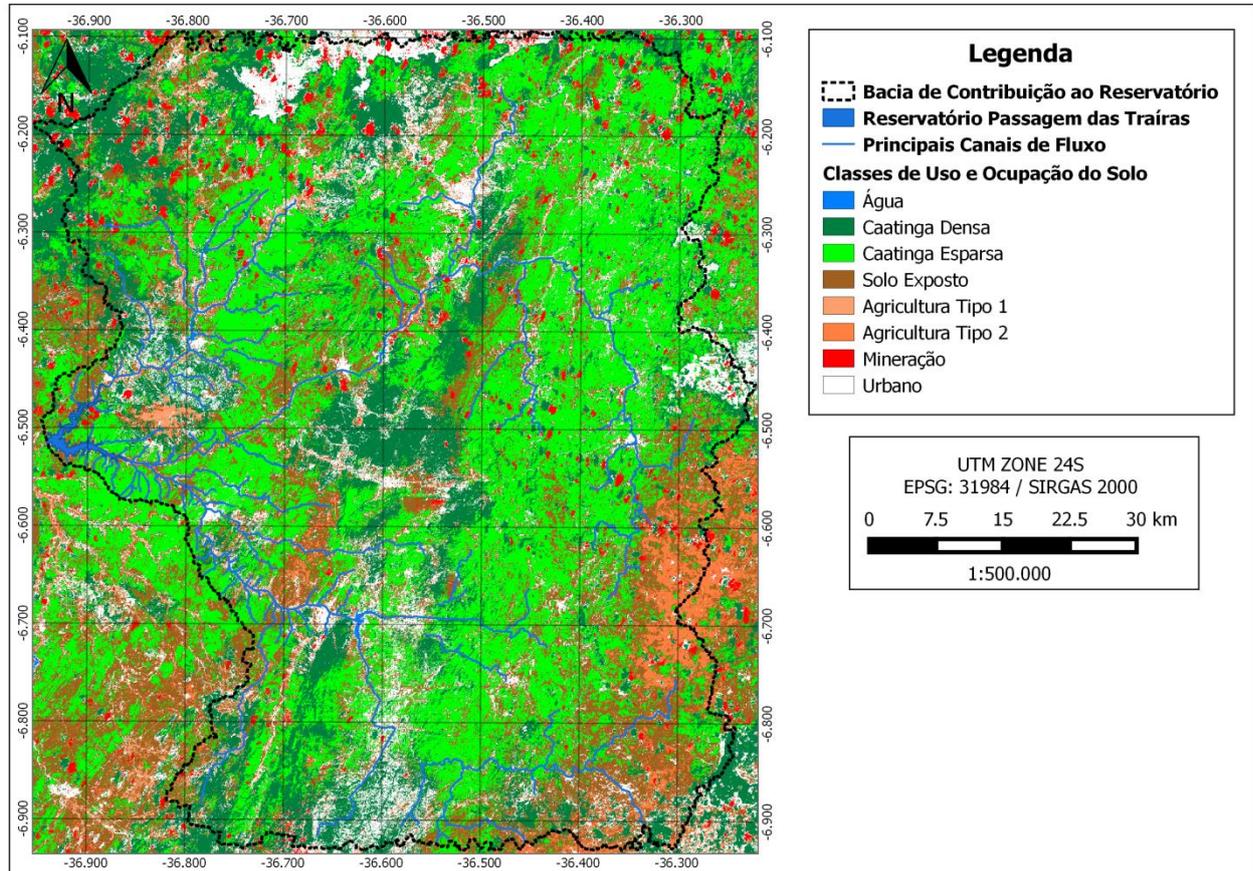
**Figura 11** - Mapa de classificação dos solos, segundo shape e classificação da EMBRAPA (Fonte: a autora).

Por fim, obteve-se o mapa de uso e ocupação por meio da classificação supervisionada (Figura 12), que forneceu as atividades antrópicas de uso e ocupação exercidas na bacia do reservatório Passagem das Traíras, bem como a soma total das áreas dedicadas a cada atividade e a porcentagem dessas áreas em relação à área total que foi analisada (Tabela 4).

Durante a classificação supervisionada, notamos que os campos de agricultura apresentaram dois diferentes padrões de reflectância, causados, talvez, pelas diferenças entre as plantas cultivadas. Por isso, foram admitidas duas classes de reflectância, o que correspondeu às classes de uso Agricultura 1 e 2. Outra razão para a classificação proposta foi tentar evitar que, ao condensar ambas as reflectâncias em uma só classe, houvesse uma menor acurácia por parte do programa durante a interpretação dos campos selecionados e, assim, maior erro nos resultados gerados. Dessa maneira, a área total de agricultura é igual à soma das classes Agricultura 1 e 2, o que corresponde a 571,79 km<sup>2</sup>, ou seja, 4,86% da área da imagem analisada.

A reflectância da classe mineração é semelhante à das nuvens, de maneira que pode existir erro nos valores de áreas de mineração, os quais, pela presença de nuvens, podem ter sido

majorados. Entretanto, os índices de nuvens das imagens utilizadas para a classificação eram baixos (14,82% na imagem 215064 e 1,37% na imagem 215065) e a própria classe mineração apresentou o menor valor de área em relação aos outros usos (483,44 km<sup>2</sup>) e, conseqüentemente, a menor porcentagem entre todas (4,11%) (Tabela 4), o que permite a desconsideração desse possível erro.



**Figura 12** - Mapa de uso e ocupação das atividades antrópicas encontradas por classificação supervisionada para a bacia de drenagem do reservatório Passagem das Traíras (Fonte: a autora).

**Tabela 4** - Valores de área e porcentagens correspondentes para cada classe de uso e ocupação identificada para a bacia do reservatório Passagem das Traíras.

Classes de Uso e Ocupação	Área	
	km <sup>2</sup>	%
Água	12,02	0,10
Caatinga Densa	2.848,35	24,20
Caatinga Esparsa	3.356,88	28,52
Solo Exposto	3.048,81	25,90
Agricultura 1	234,06	1,99
Agricultura 2	337,73	2,87
Urbano	1.450,03	12,32
Mineração	483,44	4,11
Total	11.771,32	100,00

A pecuária no semiárido do Rio Grande do Norte é praticada principalmente na forma extensiva em campo aberto, de maneira que os rebanhos tem acesso a terrenos alheios que tenham vegetação natural esparsa, o que possibilita tanto a locomoção, quanto a alimentação dos animais. Além disso, é comum a prática de queimadas em áreas de caatinga arbórea ou arbustiva por parte dos criadores, a fim de facilitar o brotamento do pasto logo após o período chuvoso. O intenso pisoteio dos animais, bem como sua alimentação degradam a mata nativa podendo levar ao seu desaparecimento, deixando o solo completamente exposto. Assim, para essa região, a área de contribuição da atividade pecuarista pode ser calculada pela soma da área de caatinga esparsa com a área de solo exposto, o que resulta em 6405,69 km<sup>2</sup>, ou 54,42% da área analisada. Como se pode perceber, a pecuária é a atividade que possui a maior área na bacia estudada (Tabela 4).

Os resultados obtidos pela classificação supervisionada foram gerados a partir de bons valores de acurácia pelo usuário, os quais foram aperfeiçoados pelo programa, atingindo baixos níveis de erros (Kappa statistic = 96,7%; Kappa variance = 0,000002) (Tabela 5).

**Tabela 5** - Valores de acurácias de usuário e produzidas durante o processo de classificação supervisionada da bacia de drenagem do reservatório Pasagem das Traíras.

Classes de Uso e Ocupação	Acurácia por Classe	
	Usuário	Produzida
	—————%—————	
Água	100,0	99,7
Caatinga Densa	99,9	98,4
Caatinga Esparsa	99,4	97,2
Solo Exposto	81,8	93,8
Agricultura 1	99,1	98,6
Agricultura 2	98,3	93,1
Urbano	95,2	99,4
Mineração	80,4	99,3
<b>Média</b>	<b>97,3</b>	<b>97,4</b>

### 3.2. Atributos físicos e químicos do solo

Os atributos físicos e químicos estudados variaram de acordo com as formas de uso e cobertura do solo, havendo diferenças significativas entre as classes consideradas (Tabelas 6 e 7). A área de mata nativa foi selecionada para servir de referência de qualidade ambiental para os solos da bacia hidrográfica, sendo a qualidade do ambiente avaliado determinada através da comparação entre os atributos da classe antrópica (AGR, AO ou PEC) e os da classe não alterada (MN).

Os solos coletados na bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras tiveram predominância da fração areia em sua composição, com valores de até 843,50 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 6). A fração argila foi a menor, apresentando valores abaixo de 65 g kg<sup>-1</sup> para todas as classes (Tabela 6). O maior valor de silte (309,00 g kg<sup>-1</sup>) foi observado para o solo sob a mata nativa, que é a área de referência de qualidade, e, para as demais áreas, os valores foram próximos ou menores que a metade do valor máximo dessa fração (Tabela 6).

**Tabela 6** - Atributos físicos de solos sob diferentes formas de uso e ocupação na bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras, São José do Seridó, RN.

<b>Ambiente</b>	<b>Ds</b> g.cm <sup>-3</sup>	<b>Dp</b> g.cm <sup>-3</sup>	<b>PT</b> %	<b>Areia</b> g.kg <sup>-1</sup>	<b>Silte</b> g.kg <sup>-1</sup>	<b>Argila</b> g.kg <sup>-1</sup>	<b>Classe Textural</b>
<b>Área de referência de qualidade</b>							
<b>MN</b>	1,28 A	2,48 AB	48,26 B	646,00 B	309,00 A	45,00 A	Franco Arenosa
<b>Áreas sob atividades antrópicas</b>							
<b>AGR</b>	1,30 A	2,71 A	51,85 B	800,75 A	159,25 B	40,00 A	Areia Franca
<b>AO</b>	0,91 B	2,26 B	59,79 A	843,50 A	91,50 B	65,00 A	Areia Franca
<b>PEC</b>	0,89 B	2,21 B	59,97 A	796,00 A	159,00 B	45,00 A	Areia Franca

Cada área antropizada foi comparada com a área de referência de qualidade do solo da região de estudo (MN). Ambientes: MN = área sob mata nativa; AGR = área de recuo da água do reservatório devido à seca, com culturas de capim elefante, milho, cana-de-açúcar, batata doce, melancia e feijão verde; AO = área com material para adubação orgânica das culturas supracitadas; PEC = áreas de atividade pecuária em uma propriedade privada, com criação de bovinos, caprinos e ovinos. Atributos: Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas; PT = porosidade total. Letras diferentes representam a diferença significativa verificada por meio do teste de Tukey.

Dessa maneira, as classes texturais dos solos das áreas estudadas variaram entre areia franca e franco arenosa (Tabela 6), entretanto somente a classe MN teve a textura classificada como franco arenosa. Isso corrobora a diferença encontrada para o teor de silte entre a classe MN e as classes antrópicas, indicando que o solo sob condições naturais possui uma tendência à evolução do processo pedogenético, o qual foi descontinuado para os solos sob usos antrópicos.

Os teores de areia ficaram negativamente correlacionados com os de silte ( $r=-0,95$ ;  $p<0,0001$ ), porém não houve correlação significativa entre os teores de areia e de argila. Esses dados sugerem que a fração silte é formada pela fração areia e que o processo pedogenético na região estudada está na fase inicial.

Quanto à densidade do solo, houve uma diferenciação significativa entre as classes estudadas (Tabela 6). Os solos das classes MN e AGR tiveram os maiores valores de densidade de solo, enquanto que solos das classes AO e PEC tiveram os menores valores, os quais foram bem semelhantes entre si (Tabela 6).

Os valores obtidos de densidade de partículas foram altos e semelhantes ao esperado para solos jovens (como luvisolos, neossolos e planossolos), pois esses solos são constituídos principalmente de minerais primários (Tabela 6). Esses dados podem ser explicados pelas

condições climáticas locais que promovem um baixo grau de intemperismo e, conseqüentemente, um processo lento de formação de solo. A porosidade total foi significativamente semelhante para as classes AGR e MN, que, para esse atributo, foram diferenciadas das classes AO e PEC (Tabela 6).

O máximo valor de densidade de partículas foi igual a 2,71 g/cm<sup>3</sup>, porém as classes MN e AGR, além de terem maiores valores de densidade do solo, apresentaram maior densidade de partícula e menor porosidade total (Tabela 6). Para as demais classes de uso, AO e PEC, foi observado o oposto, menor densidade de partícula e maior porosidade total (Tabela 6). Esses dados corroboram com a análise de correlação, que demonstrou que a densidade do solo está positivamente correlacionada com a densidade de partículas ( $r=0,87$ ;  $p<0,0001$ ) e negativamente com a porosidade total ( $r=-0,93$ ;  $p<0,0001$ ).

Em relação aos atributos químicos, os usos antrópicos provocaram alterações na reação do solo, passando o solo a ter reação alcalina após a substituição da mata nativa pela atividade de agricultura e pecuária. As áreas com excretas de animais apresentaram os maiores teores de matéria orgânica, porém a classe AO teve o maior pH dentre as áreas estudadas (Tabela 7).

A condutividade elétrica do solo apresentou valores em função dos usos, havendo uma nítida distinção entre a área de referência e as classes antrópicas (Tabela 7). As amostras coletadas da classe MN exibiram os valores mais baixos de condutividade elétrica, ao passo em que as classes AGR, AO e PEC apresentaram valores mais altos para este atributo (Tabela 7).

Da mesma forma, o complexo sortivo sofreu alterações de acordo com as atividades de uso e ocupação realizadas. Foram observados aumentos significativos nos teores de cátions trocáveis para as classes AO e PEC e, conseqüentemente, maior soma de bases e capacidade de troca catiônica para essas classes (Tabela 7). As classes MN e AGR apresentaram teores semelhantes de cátions trocáveis, sendo significativamente diferentes apenas para Ca<sup>2+</sup> e Na<sup>+</sup> trocáveis, com MN com os maiores valores de Ca<sup>2+</sup> e AGR com os maiores valores de Na<sup>+</sup> (Tabela 7).

Além disso, as classes de usos antrópicos tiveram sua acidez potencial reduzida, o que fez com que fossem observados os maiores valores de saturação por bases nessas classes (Tabela 7), resultando numa correlação negativa entre esses atributos ( $r=-0,99$ ;  $p<0,0001$ ). Todos os solos apresentaram saturação por bases maior que 50%, evidenciando a condição de eutrofia, a qual foi ainda maior para os solos antropizado (Tabela 7).

**Tabela 7** - Atributos químicos de solos sob diferentes formas de uso e ocupação na bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras, São José do Seridó, RN.

Ambiente	pH	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	H <sup>+</sup> +Al <sup>3+</sup>	SB	CTC	V	PST	MO	N	P
		<i>mS.cm<sup>-1</sup></i>	<i>cmolc.dm<sup>-3</sup></i>						<i>%</i>		<i>g.kg<sup>-1</sup></i>	<i>g.dm<sup>-3</sup></i>	<i>mg.dm<sup>-3</sup></i>	
<b>MN</b>	5,79 C	0,22 B	7,75 BC	5,44 B	0,19 D	0,47 B	4,63 A	13,85 B	18,48 B	74,95 B	1,07 C	40,47 BC	1,93 B	6,43 C
<b>AGR</b>	7,78 B	3,85 A	4,78 C	5,13 B	5,54 C	0,30 B	0,23 B	15,75 B	15,98 B	98,90 A	35,08 A	11,91 C	0,63 B	3,19 C
<b>AO</b>	8,99 A	7,46 A	14,02 A	12,88 A	9,69 A	11,88 A	0,00 B	48,46 A	48,46 A	100,00 A	20,12 B	64,39 AB	4,68 A	66,09 B
<b>PEC</b>	7,71 B	7,39 A	8,86 B	12,31 A	7,45 B	15,67 A	0,00 B	44,30 A	44,30 A	100,00 A	16,97 B	101,08 A	5,17 A	113,26 A

Cada área antropizada foi comparada com a área de referência de qualidade do solo da região de estudo (MN).

Ambientes: MN = área sob mata nativa; AGR = área de recuo da água do reservatório devido à seca, com culturas de capim elefante, milho, cana-de-açúcar, batata doce, melancia e feijão verde; AO = área com material para adubação orgânica das culturas supracitadas; PEC = áreas de atividade pecuarista em uma propriedade privada, com criação de bovinos, caprinos e ovinos. Atributos: CE = condutividade elétrica; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica potencial (pH = 7); V = saturação por bases; PST = saturação por sódio; MO = matéria orgânica; N = nitrogênio; P = fósforo. Letras diferentes representam a diferença significativa entre os valores de acordo com o teste de Tukey.

A saturação por sódio foi baixa apenas para a classe MN (Tabela 7), indicando que os usos antrópicos, sobretudo a agricultura, favorecem a salinização do solo. Dessa forma, os solos sob atividades humanas podem ser classificados como sódicos, pois tiveram saturação por sódio acima de 15 % (Tabela 7).

Quanto ao teor de matéria orgânica presente no solo, os maiores valores foram encontrados para as áreas das classes PEC (101,08 g.kg<sup>-1</sup>) e AO (64,39 g.kg<sup>-1</sup>), como consequência das atividades praticadas nelas (Tabela 7). A classe AGR apresentou o menor teor de matéria orgânica, o que possivelmente foi resultado da respiração das plantas cultivadas (Tabela 7).

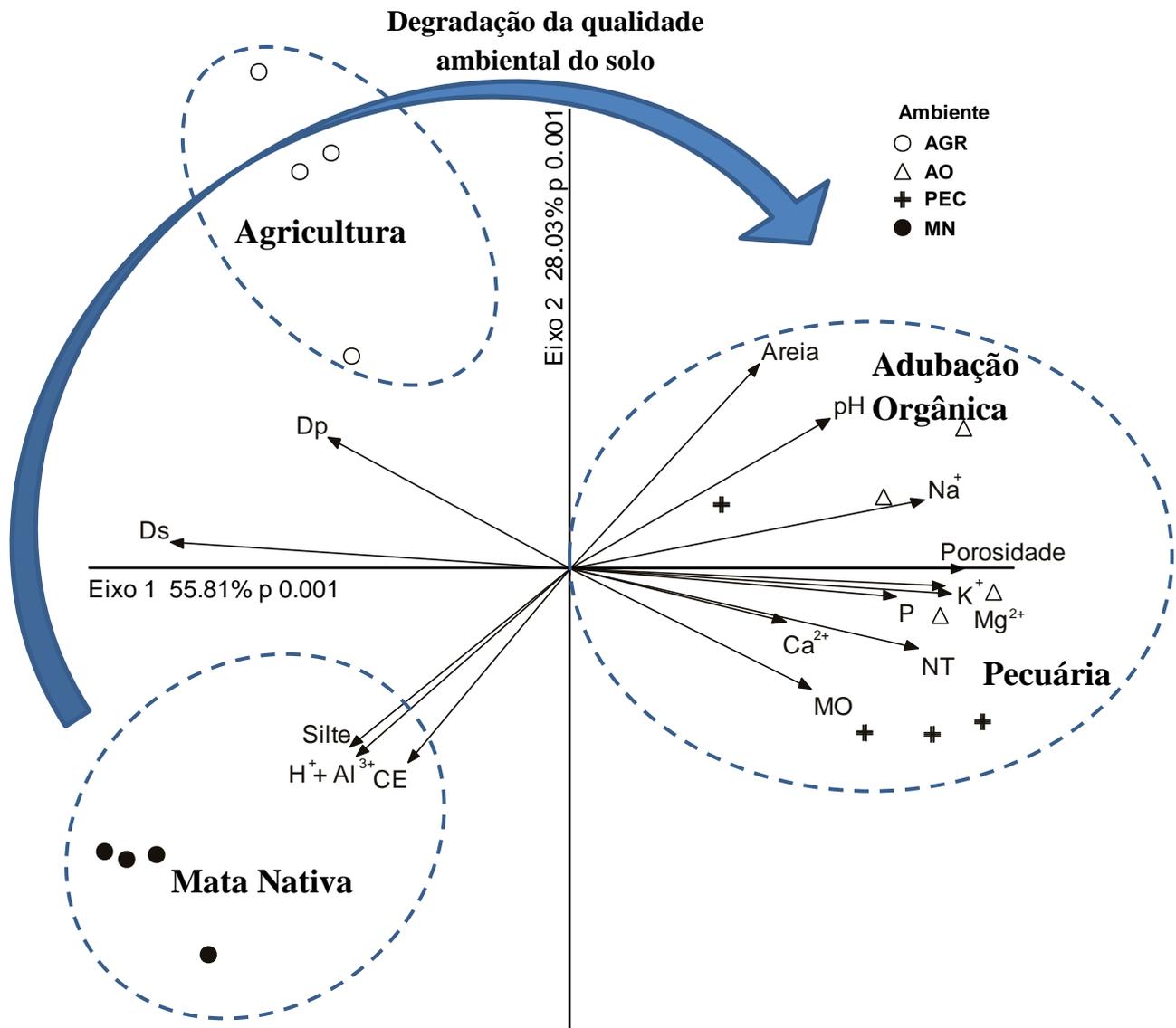
Em relação a isso, as classes AO e PEC obtiveram as menores densidades do solo e as maiores porosidades totais, como consequência do aumento do teor de matéria orgânica causada pelos usos antrópicos (Tabela 7). Essa relação foi constatada pelas correlações obtidas da matéria orgânica com densidade do solo ( $r=-0,85$ ;  $p< 0,0001$ ) e com porosidade total ( $r=0,71$ ;  $p< 0,0001$ ).

As classes PEC e AO apresentaram os maiores valores de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio (Tabela 7). A classe AGR teve o menor teor de matéria orgânica e menores valores de fósforo e nitrogênio, muito provavelmente pela utilização desses nutrientes pelas plantas (Tabela 7). A matéria orgânica esteve positivamente relacionada tanto com os teores de fósforo ( $r=0,86$ ;  $p<0,0001$ ), quanto com os de nitrogênio ( $r=0,89$ ;  $p<0,0001$ ). Além disso, os teores de fósforo e nitrogênio apresentaram forte correlação entre si ( $r=0,92$ ;  $p<0,0001$ ) e com a capacidade de troca catiônica ( $r=0,87$ ;  $p<0,0001$  para fósforo e  $r=0,95$ ;  $p<0,0001$  para nitrogênio).

A análise de componentes principais (ACP), realizada utilizando 6 atributos físicos e 10 atributos químicos do solo, explicou 83,85% da variabilidade dos dados nos dois primeiros eixos (Figura 13). O eixo 1 explicou 55,81% ( $p<0,001$ ) dos dados e o eixo 2 explicou 28,04% dos dados ( $p<0,001$ ). A ACP evidenciou um gradiente de degradação do solo, destacando que os solos sob os usos AO e PEC estão mais suscetíveis à erosão e proporcionam maior risco de aporte de nutrientes e matéria orgânica ao manancial. Além disso, a ACP revelou a homogeneidade entre os pontos amostrais para cada classe selecionada em campo (Figura 13).

Os resultados da ACP revelaram a segregação das unidades amostrais em função dos eixos e de seus lados (positivo e negativo) (Figura 13). O eixo 1 ficou positivamente correlacionado com porosidade total ( $r=0,94$ ), pH ( $r=0,77$ ) e teores de Ca<sup>2+</sup> ( $r=0,67$ ), Mg<sup>2+</sup> ( $r=0,91$ ), Na<sup>+</sup> ( $r=0,82$ ), e K<sup>+</sup> trocáveis ( $r=0,96$ ), teor de matéria orgânica ( $r=0,71$ ), teor de nitrogênio total ( $r=0,83$ ) e teor de fósforo disponível ( $r=0,93$ ) e negativamente com teor de silte ( $r=-0,59$ ), densidade de solo ( $r=-0,94$ ), densidade de partículas ( $r=-0,74$ ) e teor de H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup>

trocáveis ( $r=-0,73$ ). O eixo 2 ficou positivamente correlacionado com o teor de areia ( $r=0,68$ ) e negativamente com condutividade elétrica ( $r=-0,79$ ).



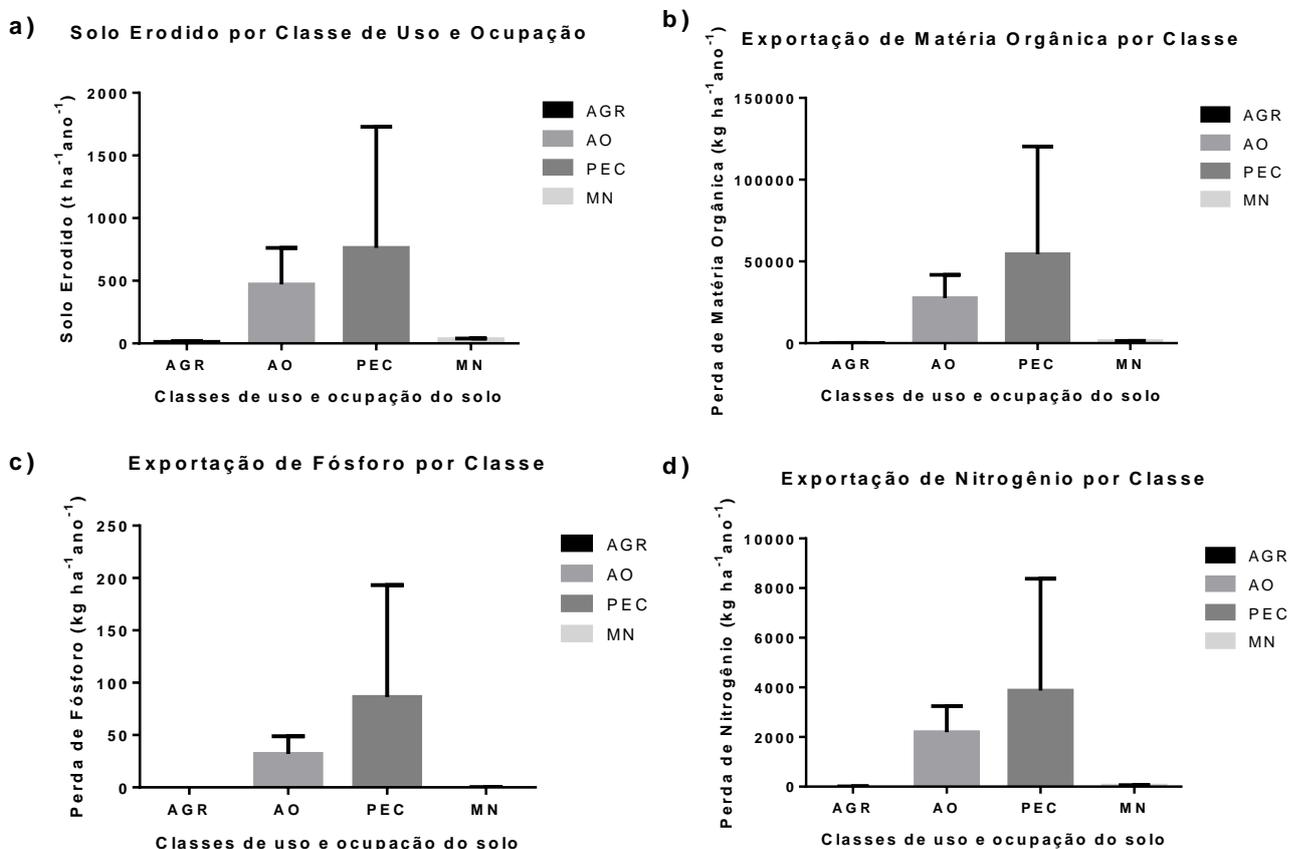
**Figura 13** - Análise de componente principal (ACP) de atributos químicos e físicos de solo sob diferentes formas de uso e ocupação na bacia hidrográfica do reservatório Passagem das Traíras, São José do Seridó, RN.

Unidades amostrais: Ambientes - MN = área sobre mata nativa; AGR = área de recuo da água do reservatório devido à seca, com culturas de capim elefante, milho, cana-de-açúcar, batata doce, melancia e feijão verde; AO = área com material para adubação orgânica das culturas supracitadas; PEC = áreas de atividade pecuarista em uma propriedade privada, com criação de bovinos, caprinos e ovinos. Atributos – Areia = teor de areia encontrada no solo; Silte = teor de silte encontrado no solo; Argila = teor de argila encontrada no solo; Ds = Densidade do solo; Dp = Densidade de partículas; Porosidade = Porosidade total; CE = condutividade elétrica; Ca<sup>2+</sup> = teor do íon Ca<sup>2+</sup> presente no solo; Mg<sup>2+</sup> = teor do íon Mg<sup>2+</sup> presente no solo; Na<sup>+</sup> = teor do íon Na<sup>+</sup> presente no solo; K<sup>+</sup> = teor do íon K<sup>+</sup> presente no solo; H<sup>+</sup>+Al<sup>3+</sup> = soma dos teores dos íons H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> presentes no solo; MO = teor de matéria orgânica do solo; NT = teor de nitrogênio total do solo; P = teor de fósforo disponível do solo.

Os solos com atividade pecuarista (PEC) e com adubação orgânica (AO) ficaram bem relacionados com o lado positivo do eixo 1 e com as unidades amostrais de pH, os teores de areia, de cátions trocáveis, nitrogênio total, fósforo disponível e matéria orgânica (Figura 13). O solo da classe MN, por sua vez, ficou bem relacionado com os atributos teor de silte, teores de hidrogênio e alumínio trocáveis e condutividade elétrica (Figura 13). O solo sob a classe AGR se relacionou apenas com a variável densidade de partículas. Por fim, a ACP indica um gradiente de degradação da qualidade ambiental do solo em função da modalidade de uso e ocupação praticada no solo (Figura 13) e sugere que os solos sob as classes AO e PEC são os mais prejudicados.

### 3.3. Erosão hídrica e contribuição dos solos sob usos antrópicos para a eutrofização do reservatório

A erosão hídrica do solo variou em função do uso e ocupação do solo, sendo mais intensa nos usos antrópicos (Figura 14). Das classes antrópicas, as que apresentaram maior risco de aporte de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio ao reservatório foram AO e PEC, principalmente a PEC (Figura 14).



**Figura 14** - Taxas de: a) solo perdido por erosão; b) exportação de matéria orgânica; c) exportação de fósforo; e d) exportação de nitrogênio, de acordo com as classes de uso e ocupação.

Ambientes: AGR = área de recuo da água do reservatório devido à seca, com culturas de capim elefante, milho, cana-de-açúcar, batata doce, melancia e feijão verde; AO = área com material para adubação orgânica das culturas supracitadas; PEC = áreas de atividade pecuária em uma propriedade privada, com criação de bovinos, caprinos e ovinos; e MN = área sob mata nativa.

A classe AGR demonstrou o menor risco, inclusive menor que a classe MN (Figura 14). Porém isso não se deu pela atividade de cultivo em si, mas sim pela grande proximidade das áreas de cultivo analisadas ao reservatório (as culturas eram plantadas no recuo do espelho d'água provocado pela seca), o que resultou em baixíssimos valores do fator de efeito combinado do declive e do comprimento de rampa, minorando consideravelmente os valores de solo erodido para essa classe.

#### 4. DISCUSSÃO

Em relação ao uso e ocupação do solo, a classificação supervisionada permitiu identificar as seguintes atividades na bacia do reservatório Passagem das Traíras: pecuária, agricultura, ocupação urbana e mineração. Dentre essas, destaca-se a pecuária por ter maior percentual da área analisada (54,42%), na qual 26% consistem em solo exposto, indicando um possível processo de desertificação. Apesar de não haver práticas de preservação da cobertura natural, a caatinga densa apresentou a segunda maior área (24,20%).

Atividades humanas realizadas na bacia, sem manejo adequado ou sustentável, alteram negativamente os atributos físicos e químicos do solo e prejudicam sua qualidade. As consequências dos impactos antrópicos em uma bacia de drenagem ocorrem a maiores proporções quando o solo apresenta uma fragilidade intrínseca, decorrente das condições ambientais (Pereira & Dantas Neto 2014). Os resultados obtidos demonstram que as formas de uso e ocupação identificadas em campo (agricultura, adubação orgânica e pecuária) não somente degradam a qualidade ambiental do solo, como também intensificam o processo de erosão do solo, que é comum na região do semiárido brasileiro.

As análises de geoprocessamento evidenciaram a presença de solos jovens da região semiárida, como os luvisolos e os neossolos. Os dados granulométricos confirmaram este fato ao mostrarem a predominância da fração areia nesses solos, revelando o baixo desenvolvimento dos solos da área estudada. Isso é resultado principalmente do clima da região, que é caracterizado por ser quente e seco, ter altas taxas de evapotranspiração e baixas taxas de precipitações, gerando um déficit hídrico na maioria dos meses do ano.

Tais condições pluviométricas não são favoráveis à pedogênese, pois dificultam o processo de intemperismo químico pela escassez de água disponível do solo, a qual consiste no

elemento e meio essenciais para as reações químicas de desenvolvimento do solo. Dessa forma, o processo de formação do solo nessa região ocorre principalmente pelo intemperismo físico, que, por consistir no simples dilatar e contrair das rochas, fragmentos e grãos, ocorre de forma lenta.

De fato, os solos da região semiárida no Brasil são geralmente pouco desenvolvidos, sendo rasos e de textura arenosa (Pereira & Dantas Neto 2014). A predominância da fração areia e, conseqüentemente, a classificação textural arenosa para os solos de todas as classes estudadas corroboram o esperado para o solo do semiárido nordestino (arenoso) e com os resultados obtidos por meio de análise de geoprocessamento.

Apesar disso, os solos coletados em campo, classificados como Luvisolos, apresentam um fraco, porém relevante, desenvolvimento pedogenético, apresentando horizonte Bt, sendo mais evoluídos que os Neossolos. Solos mais maduros em condições naturais tem pH ácido, devido ao maior teor de óxidos formados pela longa degradação de rochas e fragmentos minerais. Além disso, solos mais maduros possuem predominância das frações mais finas, em prol do maior tempo de exposição do material mineral às intempéries. Os solos jovens, por sua vez, possuem pH alcalino, devido ao menor tempo dedicado à decomposição mineral, o que resulta numa granulometria maior.

Nesse contexto, vale salientar que a composição granulométrica se deu de forma homogênea para as classes de usos antrópicos (AGR, AO e PEC), distinguindo-se apenas da classe de solo não alterado (MN), que foi classificada como franco arenoso. O solo encontrado sob mata nativa (MN) durante a coleta em campo apresentou uma tendência à evolução do processo pedogenético, o qual foi superior ao das demais classes (AGR, AO, e PEC). O pH mais ácido (Silva et al. 2015), o maior teor de silte (fração mais fina), bem como a maior acidez potencial e a classificação textural franco arenosa verificados para o solo sob vegetação nativa confirmam essa informação. O oposto foi observado para os solos antropizados (i.e. pH tendendo a alcalino, menores teores de acidez potencial e silte, além da classificação textural como areia franca). Dessa forma, pode-se afirmar que as atividades antrópicas nessa região inibiram a continuidade da pedogênese, a qual já ocorre de forma lenta para a região semiárida.

Em relação à densidade do solo, os valores para AGR e MN foram altos e semelhantes, coincidindo com o que é esperado para solos jovens, pois esses solos são constituídos principalmente de minerais primários. Além disso, como na área de agricultura era usado o plantio direto, sem uso de máquinas ou revolvimento do solo, não houve alterações significativas de densidade do solo para esse uso. Entretanto, as classes AO e PEC apresentaram redução desse atributo.

Para o solo da classe AO, a adição de matéria orgânica alterou a composição do solo, havendo acréscimo de partículas orgânicas que são mais leves que as minerais, reduzindo a densidade. Apesar de ser esperado um aumento da densidade do solo para a área sob pecuária (Carvalho et al. 2015), o pequeno número de animais e a contínua deposição de excretas dos animais proporcionou a manutenção de um tapete de estrume, o que levou ao prevaletimento da adição de matéria orgânica sobre o efeito do pisoteio dos rebanhos.

A densidade de partículas e a porosidade total, por conseguinte, seguiram esses efeitos da matéria orgânica. As classes MN e AGR apresentaram os menores teores de matéria orgânica, o que preservou a densidade de partículas e a porosidade total para esses usos. Para o uso agrícola, entretanto, foi observado o menor teor de matéria orgânica, o que pode ter sido resultado da maior atividade biológica, com consequente maior consumo de carbono orgânico prontamente disponível (Jakelaitis et al. 2008).

Essa redução da matéria orgânica para a classe AGR levou ao aumento da densidade de partículas, apesar da porosidade não ter sido alterada, sendo este atributo significativamente igual ao da classe MN. Em contrapartida, para as classes AO e PEC, a adição de matéria orgânica diminuiu a densidade de partículas e aumentou a porosidade total. O menor teor de matéria orgânica em AO em relação a PEC pode ter sido resultado da absorção pelo solo e da mineralização do esterco, o qual está mais fresco e é resposto imediatamente para a classe PEC pelos animais, com menor perda do material orgânico para esta classe. Vale a pena salientar que a redução da densidade do solo evidencia o fato de que a adição antrópica de matéria orgânica ultrapassou a capacidade tampão do solo, o que leva o solo a ser fonte difusa de matéria orgânica.

O fato da porosidade total ter sido maior para os solos sob atividades antropogênicas também pode ser resposta aos maiores teores da fração areia e menor teor da fração silte verificados. Isso se deve ao fato de que, em solos predominantemente arenosos, devido ao tamanho dos grãos, há presença de poros de grande tamanho, elevando a sua porosidade. Caso haja maior presença das frações finas de solo (argila e silte), esses espaços são preenchidos pelos grãos menores, fazendo com que haja uma porosidade reduzida.

Os maiores teores de cátions trocáveis, com exceção da acidez potencial ( $H^+ + Al^{3+}$ ), aumentaram significativamente para os solos que tiveram aumento de matéria orgânica (AO e PEC) (Ceretta et al. 2003). A presença de esterco nos ambientes de AO e PEC aumentou o teor de matéria e alterou a capacidade de retenção de cátions, o que resultou também em maiores valores de SB e CTC (Silva et al. 2015). O contrário ocorreu para AGR, que teve menores valores de todos os cátions trocáveis, excluindo-se o  $Na^+$ .

A redução observada da acidez potencial para os usos antrópicos se deu pelo aumento do pH para essas classes. Pela redução desse atributo, todas as classes antrópicas atingiram altíssimos valores de saturação por bases. Além disso, essa redução influenciou no baixo valor de CTC verificado para a classe AGR, que teve redução dos cátions trocáveis  $K^+$  e  $Ca^{2+}$ , com preservação do teor de  $Mg^{2+}$  e aumento de  $Na^+$ , o que levou à maior saturação por sódio verificada, aumentando a sodicidade para essa classe. Para AO e PEC, o grande aumento dos teores de todos os cátions trocáveis superou a redução da acidez potencial, garantindo os maiores valores de CTC para essas classes. A mata nativa, por sua vez, não teve aumento de cátions trocáveis, mas manteve a acidez potencial, resultando num equilíbrio e, assim, obtendo um valor de CTC significativamente semelhante ao de agricultura.

Os maiores teores de cátions levaram a uma maior condutividade elétrica (CE), que foi mais alta para AO e PEC. Para AGR, houve a redução dos cátions  $K^+$  e  $Ca^{2+}$ , a qual foi compensada pelos teores dos demais cátions ( $Mg^{2+}$  e  $Na^+$ ), o que aumentou um pouco sua condutividade elétrica. Devido à menor presença de cátions trocáveis, a mata nativa apresentou a menor CE.

As excretas de animais consistem ainda numa grande fonte de matéria orgânica e nutrientes (Ceretta et al. 2003; Silva et al. 2015), como o fósforo e o nitrogênio. Por essa razão, os usos que adicionam esterco ao solo (AO e PEC) apresentaram tanto os maiores teores de fósforo como de nitrogênio, aumentando ainda mais a fertilidade natural do solo da região. O oposto foi verificado para a agricultura, que mesmo com adubação orgânica, o alto consumo microbiano de matéria orgânica diminuiu os teores de P e N para este uso (Jakelaitis et al. 2008), que se foram significativamente iguais aos teores observados para mata nativa.

Os Luvisolos apresentam naturalmente uma grande suscetibilidade à erosão. Essa característica foi agravada para os solos sob as atividades humanas, conforme verificado pela perda do teor de silte verificado para os usos antrópicos (AGR, AO e PEC), em comparação ao solo não alterado (MN). A mata nativa preservou a fração mais fina do solo (silte), ao passo em que as demais classes tiveram o teor de silte reduzido significativamente, indicando a ocorrência de erosão nos solos que foram antropizados. Isso foi confirmado pelo cálculo da erosão hídrica pela, que revelou um processo erosivo ainda mais intenso para as classes de adubação orgânica e pecuária.

Apesar da classe agricultura não ter apresentado grande erosão do solo pela EUPS, o fenômeno ocorre para tal uso, pois houve uma diferença significativa entre os teores de silte dessa classe e os da classe MN. Contudo, resultou do pequeno valor obtido para o fator de efeito combinado do declive e do comprimento de rampa, que minorou a quantidade total de solo

erodido para a agricultura, e não porque essa atividade não oferece risco de erosão. De fato, a inclinação dos pontos de coleta de solo sob cultivos em relação ao reservatório era ínfima. Porém, isso aconteceu pelo fato de que o plantio era feito dentro da projeção do espelho d'água em condições de volume máximo do sistema, ou seja, feito dentro da área alagável do próprio reservatório. Dessa forma, todos os nutrientes e matéria orgânica aplicados nessa área entraram no sistema.

Diante disso, a antropização do solo além de alterar as suas propriedades físicas e químicas (Pereira & Thomaz 2015), podem aumentar os teores de nutrientes e agravar o processo de perda de solo por erosão (Ouyang et al. 2010a). A combinação desses efeitos finda num maior risco de prejuízo de mananciais superficiais inseridos em bacias hidrográficas que sofre tais alterações, pelo carreamento de sedimentos e nutrientes, podendo ocasionar ou agravar os processos de assoreamento e de eutrofização desses sistemas (Carpenter et al. 1998).

Além disso, a falta de manejo nos ambientes semiáridos, somada a grandes impactos antrópicos e à fragilidade ambiental característica da região concorrem para a degradação do solo (Pereira & Dantas Neto 2014). Contudo, o solo é um sistema aberto, de forma que as consequências das atividades de uso e ocupação não se restrinjam ao solo. Os efeitos são também propagados para os ambientes aquáticos de maneira intensa por meio da poluição difusa.

Os resultados obtidos apontam a pecuária como atividade mais ameaçadora e preocupante, pois ao mesmo tempo aumenta os teores de nitrogênio e fósforo e intensifica o processo erosivo dos solos, favorecendo a degradação da qualidade da água e do funcionamento ecológico dos sistemas aquáticos. A agricultura, por sua vez, sem uso de fertilizantes e sob o plantio direto pode ajudar na prevenção de tais problemáticas. Entretanto, as culturas devem ser feitas fora da área alagável dos corpos hídricos e além de suas correspondentes áreas de preservação, a fim de evitar o prejuízo da zona ripária e o aporte de material alóctone.

A fiscalização das atividades, bem como a regulamentação sobre o manejo ideal podem ser úteis para a prevenção e recuperação da qualidade do solo e também dos mananciais. A avaliação, o zoneamento e o planejamento da bacia como um todo constituem em uma solução holística aos problemas aqui apresentados, proporcionando o manejo e a mitigação efetiva das alterações antropogênicas sobre qualidade da água, que, para essa região, já é tão escassa (Barbosa et al. 2012).

## **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Barbosa JEDL, Medeiros ESF, Brasil J, et al (2012) Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. *Acta Limnol Bras* 24:103–118. doi: 10.1590/S2179-

975X2012005000030

- Bertoni J, Lombardi Neto F (1990) *Conservação do Solo*. Ícone Editora, São Paulo
- Carpenter SR, Caraco NF, Correll DL, et al (1998) Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecol Appl* 8:559–568.
- Carvalho RP de., Daniel O, Davide AC, Souza FR de. (2015) Atributos físicos e químicos de um neossolo quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Rev Caatinga* 28:148–159.
- Ceretta CA, Durigon R, Basso CJ, et al (2003) Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural. *Pesqui Agropecu Bras* 38:729–735.
- Davies BE (1974) Loss-on-ignition as an Estimate of Soil Organic Matter. *Soil Sci Soc Am Proc* 38:347–353.
- Doran JW, Parkin TB (1994) The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart BA (ed) *Defining soil quality for sustainable environment*. Soil Science Society of America, Madison, Wiscosin, EUA, pp 37–52
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil) (EMBRAPA) (1971) Levantamento Exploratório - Reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil) (EMBRAPA) (1997) Manual de métodos de análise de solo, 2ª edição. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil) (EMBRAPA) (1999) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes, 1ª edição. Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, Brasília
- Eskinazi-Sant'Anna EM, Menezes R, Costa IS, et al (2013) Zooplankton assemblages in eutrophic reservoirs of the Brazilian semi-arid. *Braz J Biol* 73:37–52.
- Farinasso M, Carvalho Júnior OA de., Guimarães RF, et al (2006) Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS - Equação Universal de Perdas de Solo - utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba - PI-MA. *Rev Bras Geomorfol* 7:73–85.
- Guo E, Chen L, Sun R, Wang Z (2015) 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* 9:279–287. doi: 10.1007/s11783-014-0667-8
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil) (IBGE). Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/mapas\\_murais/shapes/](ftp://geoftp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/shapes/). Acesso em 13 de Novembro de 2015

- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE (Brasil) (IDEMA) (2008) Perfil do seu município: São José do Seridó. 10: 1–23.
- Islam KR, Weil RR (2000) Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agric Ecosyst Environ* 79:9–16.
- Ismail WR, Najib SAM (2011) Sediment and nutrient balance of Bukit Merah Reservoir, Perak (Malaysia). *Lakes Reserv Res Manag* 16:179–184.
- Jakelaitis A, Silva AA da, Santos JB dos., Vivian R (2008) Quality of soil surface layer under forest, pasture and cropped areas. *Pesqui Agropecuária Trop* 38:118–127.
- Katsiapi M, Mazaris AD, Charalampous E, Moustaka-Gouni M (2012) Watershed land use types as drivers of freshwater phytoplankton structure. *Hydrobiologia* 698:121–131. doi: 10.1007/s10750-012-1095-z
- Kovacs AS, Fulop B, Honti M (2012) Detection of hot spots of soil erosion and reservoir siltation in ungauged Mediterranean catchments. *Energy Procedia* 18:934–943. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.108
- Leigh C, Burford MA, Roberts DT, Udy JW (2010) Predicting the vulnerability of reservoirs to poor water quality and cyanobacterial blooms. *Water Res* 44:4487–96. doi: 10.1016/j.watres.2010.06.016
- Liu Y, Lv X, Qin X, et al (2007) An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe. *Landsc Urban Plan* 82:233–246. doi: 10.1016/j.landurbplan.2007.02.012
- Lombardi Neto F, Moldenhauer WC (1992) Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). *Bragantia* 52:189–196.
- Medeiros LDC, Mattos A, Lüring M, Becker V (2015) Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake. *Aquat Ecol* 49:293–307. doi: 10.1007/s10452-015-9524-5
- Mosley LM (2015) Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Rev* 140:203–214. doi: DOI 10.1016/j.earscirev.2014.11.010
- Mouri G (2015) Assessment of land cover relocation incorporating the effects of human activity in typical urban and rural catchments for the design of management policies. *Environ Sci Policy* 50:74–87. doi: 10.1016/j.envsci.2015.02.004
- Mouri G, Takizawa S, Oki T (2011) Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact. *J Environ Manage* 92:1837–1848. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.03.005
- Nielsen A, Trolle D, Søndergaard M, et al (2012) Watershed land use effects on lake water

- quality in Denmark. *Ecol Appl* 22:1187–200.
- Ouyang W, Skidmore AK, Hao F, Wang T (2010a) Soil erosion dynamics response to landscape pattern. *Sci Total Environ* 408:1358–66. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.062
- Özen A, Karapınar B, Kucuk İ, et al (2010) Drought-induced changes in nutrient concentrations and retention in two shallow Mediterranean lakes subjected to different degrees of management. *Hydrobiologia* 646:61–72. doi: 10.1007/s10750-010-0179-x
- Pereira AA, Thomaz EL (2015) Atributos químicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de uso e manejo no município de reserva – PR. *Caminhos Geogr* 16:186–194.
- Pereira RA, Dantas Neto J (2014) Efeito das atividades agropastoris sobre os atributos físico-químicos de três classes de solos de uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro. *Bol Goia Geogr* 34:169–188.
- Reich P, Lake PS (2015) Extreme hydrological events and the ecological restoration of flowing waters. *Freshw Biol* 60:2639–2652. doi: 10.1111/fwb.12508
- Santos JCN dos., Andrade EM de., Medeiros PHA, et al (2014b) Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* 18:1157–1164. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1157-1164>
- Silva GF da., Santos D, Silva AP da., Souza JM de. (2015) Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. *Rev Caatinga* 28:25–35.
- Thothong W, Huon S, Janeau J-L, et al (2011) Impact of land use change and rainfall on sediment and carbon accumulation in a water reservoir of North Thailand. *Agric Ecosyst Environ* 140:521–533. doi: 10.1016/j.agee.2011.02.006
- Von Sperling M (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, 3rd edn. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte
- Wen Y, Khosrowpanah S, Heitz L (2011) Land cover change of watersheds in Southern Guam from 1973 to 2001. *Environ Monit Assess* 179:521–529. doi: 10.1007/s10661-010-1760-5
- Wischmeier WH, Smith DD (1978) *Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC
- Xie J, Zhang X, Xu Z, et al (2014) Total phosphorus concentrations in surface water of typical agro- and forest ecosystems in China, 2004–2010. *Front Environ Sci Eng* 8:561–569. doi: 10.1007/s11783-013-0601-5

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nossos resultados sugerem que a qualidade da água do manancial Passagem das Traíras sofre influência tanto de eventos extremos de seca, como do uso e ocupação do solo da bacia de drenagem. A seca prolongada e as atividades antrópicas na bacia produzem um efeito combinado de potencialização do processo de eutrofização nos corpos hídricos, em especial na região semiárida.

A seca diminui o volume de água do sistema por meio da exacerbação da evaporação e redução da precipitação, o que leva ao aumento do tempo médio de renovação das águas, concentra os nutrientes e favorece a assimilação pelos produtores primários (Costa et al. 2016). Por outro lado, a redução de volume pode tanto favorecer o aumento da temperatura do sistema e, assim, a liberação de fósforo pela fertilização interna (Jeppesen et al. 2015), quanto à ressuspensão de sedimento, aumentando os teores de fósforo e sedimento (Medeiros et al. 2015).

O uso e ocupação do solo podem alterar os atributos físicos e químicos do solo (Pereira and Thomaz 2015), aumentando o teor de nutrientes e a suscetibilidade à erosão (Ouyang et al. 2010b). Dessa maneira, o solo passa a ser uma fonte difusa de poluição, contribuindo para o aporte de sedimento e nutrientes em mananciais superficiais (Carpenter et al. 1998).

A atuação conjunta das condições climáticas do semiárido e atividades humanas faz com que diversos reservatórios no semiárido estejam enfrentando o processo de eutrofização (Eskinazi-Sant'Anna et al. 2013), de forma que as águas apresentam baixa transparência e altos valores de pH, alcalinidade, condutividade elétrica (Bouvy et al. 2000) e de concentração de sólidos suspensos, amônio, nitrogênio total e biomassa fitoplanctônica com dominância de cianobactérias (Brasil et al. 2015).

Pela análise da bacia de drenagem do reservatório e cálculo da erosão, concluímos que, das formas de uso e ocupação estudadas, a adubação orgânica e a pecuária são as atividades que oferecem maiores taxas de perda de solo, bem como de nutrientes no solo, configurando as principais fontes difusas de poluição ao reservatório. Os elevados teores de nitrogênio, fósforo e matéria orgânica encontrados para ambas as classes de uso foram consequência da presença de excretas de animais.

Dessa forma, os resultados obtidos indicam que o processo de eutrofização do reservatório tende a se agravar, seja pelos eventos extremos de seca que serão cada vez mais frequentes e intensos (IPCC 2014), ou pelas atividades realizadas na bacia sem quaisquer medidas para sustentabilidade ou preservação ambiental. Além disso, em futuros períodos de

chuva, pode haver o aporte de sedimentos e nutrientes acrescidos ao solo por seu uso e ocupação, pois as atividades antrópicas aumentam a natural erodibilidade dos solos rasos do semiárido.

Visando a garantia da utilidade múltipla do reservatório, sugerimos o monitoramento da qualidade da água do reservatório e o desenvolvimento de atividades de preservação e recuperação das zonas ripárias do reservatório. Além disso, a fiscalização e investigação de atividades prejudiciais ao sistema, planejamento integrado da bacia e bem como ações de educação ambiental da população são medidas adicionais que podem ser aplicadas pelos órgãos de gestão ambiental para auxiliar na recuperação da qualidade da água de Passagem das Traíras.

## **CONCLUSÕES**

1. A seca extrema e prolongada causa a redução significativa do volume do reservatório e, com isso, aumenta a concentração de sólidos suspensos, nutrientes e clorofila-a do reservatório, degradando a qualidade da água e agravando o estado trófico do sistema.
2. Os usos antrópicos alteram de forma significativa os atributos físicos e químicos do solo, com destaque ao aumento dos teores de fósforo, nitrogênio e matéria orgânica.
3. As atividades antropogênicas (PEC, AO e AGR) aumentam a suscetibilidade natural do solo do semiárido à erosão, fazendo com que o solo atue como fonte de poluição difusa ao manancial. A agricultura também promove a perda de solo, fato que foi comprovado pelo menor teor de silte verificado para o solo sob esta atividade. Dessa forma, as classes de usos antrópicos estudadas favorecem carregamento de sedimento e nutrientes via erosão hídrica, facilitando a poluição difusa e, assim, o assoreamento e a eutrofização de mananciais superficiais, findando no prejuízo da qualidade da água.
4. Dentre as classes estudadas, a pecuária é a classe de maior potencial para poluição difusa para a região estudada, tanto pela maior quantidade de solo erodida, quanto pelos maiores teores de matéria orgânica, fósforo e nitrogênio apresentados.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil) (ANA). Disponível em:

<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/12/comeca-a-construcao-do-plano-de-seguranca-hidrica>. Acesso em 20 de Fevereiro de 2015.

<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2014/12/comeca-a-construcao-do-plano-de-seguranca-hidrica>. Accessed 20 Feb 2015

APHA (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Waste-water, 20<sup>a</sup> edn.

- Washington: APHA, AWWA and W.E.F, Washington, D. C.
- Barbosa JEDL, Medeiros ESF, Brasil J, et al (2012) Aquatic systems in semi-arid Brazil: limnology and management. *Acta Limnol Bras* 24:103–118. doi: 10.1590/S2179-975X2012005000030
- Beklioglu M, Tan CO (2008) Restoration of a shallow Mediterranean Lake by biomanipulation complicated by drought. *Fundam Appl Limnol Arch für Hydrobiol* 171:105–118. doi: 10.1127/1863-9135/2008/0171-0105
- Bertoni J, Lombardi Neto F (1990) *Conservação do Solo*. Ícone Editora, São Paulo
- Beyhan M, Kaçikoç M (2014) Evaluation of Water Quality from the Perspective of Eutrophication in Lake Eğirdir, Turkey. *Water, Air, Soil Pollut* 225:1994. doi: 10.1007/s11270-014-1994-x
- Bezerra AF de M, Becker V, Mattos A (2014) Balanço de Massa de Fósforo Total e o Estado Trófico em Reservatórios do Semiárido Brasileiro. *Rev Bras Recur Hídricos* 19:67–76.
- Bezerra Júnior JGO, Silva NM da. (2007) Caracterização geoambiental da microrregião do Seridó Oriental do Rio Grande do Norte. *Holos* 23:78–91.
- Bouvy M, Falcão D, Marinho M, et al (2000) Occurrence of *Cylindrospermopsis* (Cyanobacteria) in 39 Brazilian tropical reservoirs during the 1998 drought. *Aquat Microb Ecol* 23:13–27. doi: 10.3354/ame023013
- Bouvy M, Nascimento SM, Molica RJR, et al (2003) Limnological features in Tapacura reservoir (northeast Brazil) during a severe drought. *Hydrobiologia* 493:115–130.
- Braga GG, Becker V, Oliveira JNP de., et al (2015) Influence of extended drought on water quality in tropical reservoirs in a semiarid region. *Acta Limnol Bras* 27:15–23. doi: 10.1590/S2179-975X2214
- Brasil J, Attayde JL, Vasconcelos FR, et al (2015) Drought-induced water-level reduction favors cyanobacteria blooms in tropical shallow lakes. *Hydrobiologia*. doi: 10.1007/s10750-015-2578-5
- Carpenter SR, Caraco NF, Correll DL, et al (1998) Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecol Appl* 8:559–568.
- Carvalho RP de., Daniel O, Davide AC, Souza FR de. (2015) Atributos físicos e químicos de um neossolo quartzarênico sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Rev Caatinga* 28:148–159.
- Ceretta CA, Durigon R, Basso CJ, et al (2003) Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural. *Pesqui Agropecu Bras* 38:729–735.
- Costa MRA da., Attayde JL, Becker V (2016) Effects of water level reduction on the dynamics of phytoplankton functional groups in tropical semi-arid shallow lakes. *Hydrobiologia*. doi:

10.1007/s10750-015-2593-6

- Davies BE (1974) Loss-on-ignition as an Estimate of Soil Organic Matter. *Soil Sci Soc Am Proc* 38:347–353.
- Dokulil MT (2015) Climate impacts on ecohydrological processes in aquatic systems. *Ecohydrol Hydrobiol* 1-5:2015. doi: 10.1016/j.ecohyd.2015.08.001
- Doran JW, Parkin TB (1994) The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W.; Coleman, D.C.; Bezdicek, D.F.; Stewart BA (ed) *Defining soil quality for sustainable environment*. Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, EUA, pp 37–52
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil) (EMBRAPA) (1971) Levantamento Exploratório - Reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Norte.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil) (EMBRAPA) (1997) Manual de métodos de análise de solo, 2ª edição. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (Brasil) (EMBRAPA) (1999) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes, 1ª edição. Embrapa Comunicação para transferência de tecnologia, Brasília
- Eskinazi-Sant'Anna EM, Menezes R, Costa IS, et al (2013) Zooplankton assemblages in eutrophic reservoirs of the Brazilian semi-arid. *Braz J Biol* 73:37–52.
- Farinasso M, Carvalho Júnior OA de., Guimarães RF, et al (2006) Avaliação qualitativa do potencial de erosão laminar em grandes áreas por meio da EUPS - Equação Universal de Perdas de Solo - utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba - PI-MA. *Rev Bras Geomorfol* 7:73–85.
- Figueirêdo MCB De, Teixeira AS, Araújo LDFP, et al (2007) Evaluation of reservoirs environmental vulnerability to eutrophication. *Eng Sanit e Ambient* 12:399–409. doi: 10.1590/S1413-41522007000400006
- Freitas FRS, Righetto AM, Attayde JL (2011) Suspended solids and phosphorus load in a brazilian semi-arid reservoir. *Oecologia Aust* 15:655–665. doi: 10.4257/oeco.2011.1503.16
- Geraldes AM, Boavida MJ (2005) Seasonal water level fluctuations: Implications for reservoir limnology and management. *Lakes Reserv Res Manag* 10:59–69. doi: 10.1111/j.1440-1770.2005.00257.x
- Guo E, Chen L, Sun R, Wang Z (2015) 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* 9:279–287. doi: 10.1007/s11783-014-0667-8

- Hayes NM, Vanni MJ, Horgan MJ, Renwick WH (2015) Climate and land use interactively affect lake phytoplankton nutrient limitation status. *Ecology* 96:392–402. doi: 10.1890/13-1840.1
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (Brasil) (IBGE). Disponível em: [ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas\\_tematicos/mapas\\_murais/shapes/](ftp://geofp.ibge.gov.br/mapas_tematicos/mapas_murais/shapes/). Acesso em 13 de Novembro de 2015
- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE (Brasil) (IDEMA) (2008) Perfil do seu município: São José do Seridó. 10: 1–23.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (Brasil) (INMET). Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/indicePrecipitacaoPadronizada/>. Acesso em 24 de Abril de 2015
- IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32
- Islam KR, Weil RR (2000) Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agric Ecosyst Environ* 79:9–16.
- Ismail WR, Najib SAM (2011) Sediment and nutrient balance of Bukit Merah Reservoir, Perak (Malaysia). *Lakes Reserv Res Manag* 16:179–184.
- Jakelaitis A, Silva AA da, Santos JB dos., Vivian R (2008) Quality of soil surface layer under forest, pasture and cropped areas. *Pesqui Agropecuária Trop* 38:118–127.
- Jepersen AM, Christoffersen K (1988) Measurements of chlorophyll-a from phytoplankton using ethanol as extraction solvent. *Hydrobiologia* 109:445–454.
- Jeppesen E, Brucet S, Naselli-Flores L, et al (2015) Ecological impacts of global warming and water abstraction on lakes and reservoirs due to changes in water level and related changes in salinity. *Hydrobiologia* 750:201–227. doi: 10.1007/s10750-014-2169-x
- Jeppesen E, Meerhoff M, Davidson TA, et al (2014) Climate change impacts on lakes: An integrated ecological perspective based on a multi-faceted approach, with special focus on shallow lakes. *J Limnol* 73:88–111. doi: 10.4081/jlimnol.2014.844
- Katsiapi M, Mazaris AD, Charalampous E, Moustaka-Gouni M (2012) Watershed land use types as drivers of freshwater phytoplankton structure. *Hydrobiologia* 698:121–131. doi:

10.1007/s10750-012-1095-z

- Kosten S, Huszar VLM, Bécares E, et al (2012) Warmer climates boost cyanobacterial dominance in shallow lakes. *Glob Chang Biol* 18:118–126. doi: 10.1111/j.1365-2486.2011.02488.x
- Kottek M, Grieser J, Beck C, et al (2006) World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol Zeitschrift* 15:259–263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Kovacs AS, Fulop B, Honti M (2012) Detection of hot spots of soil erosion and reservoir siltation in ungauged Mediterranean catchments. *Energy Procedia* 18:934–943. doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.108
- Lee RM, Biggs TW (2015) Impacts of land use, climate variability, and management on thermal structure, anoxia, and transparency in hypereutrophic urban water supply reservoirs. *Hydrobiologia* 745:263–284. doi: 10.1007/s10750-014-2112-1
- Leigh C, Burford MA, Roberts DT, Udy JW (2010) Predicting the vulnerability of reservoirs to poor water quality and cyanobacterial blooms. *Water Res* 44:4487–96. doi: 10.1016/j.watres.2010.06.016
- Liu Y, Lv X, Qin X, et al (2007) An integrated GIS-based analysis system for land-use management of lake areas in urban fringe. *Landsc Urban Plan* 82:233–246. doi: 10.1016/j.landurbplan.2007.02.012
- Lombardi Neto F, Moldenhauer WC (1992) Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). *Bragantia* 52:189–196.
- Medeiros LDC, Mattos A, Lüring M, Becker V (2015) Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake. *Aquat Ecol* 49:293–307. doi: 10.1007/s10452-015-9524-5
- Mimikou MA, Baltas E, Varanou E, Pantazis K (2000) Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *J Hydrol* 234:95–109. doi: 10.1016/S0022-1694(00)00244-4
- Mosley LM (2015) Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. *Earth-Science Rev* 140:203–214. doi: DOI 10.1016/j.earscirev.2014.11.010
- Moss B, Kosten S, Meerhoff M, et al (2011) Allied attack: climate change and eutrophication. *Int Waters* 1:101–105.
- Mouri G (2015) Assessment of land cover relocation incorporating the effects of human activity in typical urban and rural catchments for the design of management policies. *Environ Sci Policy* 50:74–87. doi: 10.1016/j.envsci.2015.02.004

- Mouri G, Takizawa S, Oki T (2011) Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact. *J Environ Manage* 92:1837–1848. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.03.005
- Murphy J, Riley JP (1962) A Modified Single Solution Method for the Determination of Phosphate in Natural Waters. *Anal Chim Acta* 27:31–36.
- Nielsen A, Trolle D, Bjerring R, et al (2014) Effects of climate and nutrient load on the water quality of shallow lakes assessed through ensemble runs by PCLake. *Ecol Appl* 24:1926–1944.
- Nielsen A, Trolle D, Søndergaard M, et al (2012) Watershed land use effects on lake water quality in Denmark. *Ecol Appl* 22:1187–200.
- Olds BP, Peterson BC, Koupal KD, et al (2011) Water quality parameters of a Nebraska reservoir differ between drought and normal conditions. *Lake Reserv Manag* 27:229–234. doi: 10.1080/07438141.2011.601401
- Ouyang W, Skidmore AK, Hao F, Wang T (2010a) Soil erosion dynamics response to landscape pattern. *Sci Total Environ* 408:1358–66. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.10.062
- Ouyang W, Skidmore AK, Toxopeus AG, Hao F (2010b) Long-term vegetation landscape pattern with non-point source nutrient pollution in upper stream of Yellow River basin. *J Hydrol* 389:373–380. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.06.020
- Özen A, Karapınar B, Kucuk İ, et al (2010) Drought-induced changes in nutrient concentrations and retention in two shallow Mediterranean lakes subjected to different degrees of management. *Hydrobiologia* 646:61–72. doi: 10.1007/s10750-010-0179-x
- Paerl HW, Hall NS, Peierls BL, Rossignol KL (2014) Evolving Paradigms and Challenges in Estuarine and Coastal Eutrophication Dynamics in a Culturally and Climatically Stressed World. *Estuaries and Coasts* 37:243–258. doi: 10.1007/s12237-014-9773-x
- Pereira AA, Thomaz EL (2015) Atributos químicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de uso e manejo no município de reserva – PR. *Caminhos Geogr* 16:186–194.
- Pereira RA, Dantas Neto J (2014) Efeito das atividades agropastoris sobre os atributos físico-químicos de três classes de solos de uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro. *Bol Goia Geogr* 34:169–188.
- Reich P, Lake PS (2015) Extreme hydrological events and the ecological restoration of flowing waters. *Freshw Biol* 60:2639–2652. doi: 10.1111/fwb.12508
- Roland F, Huszar VLM, Farjalla VF, Enrich-Prast A, Amado AM, Ometto JPHB (2012) Climate change in Brazil: perspective on the biogeochemistry of inland waters. *Braz J Biol* 72:709–722.

- Santos JCN dos., Andrade EM de., Araújo Neto JR de., et al (2014a) Land use and trophic state dynamics in a tropical semi-arid reservoir. *Rev Ciência Agronômica* 45:35–44.
- Santos JCN dos., Andrade EM de., Medeiros PHA, et al (2014b) Determinação do fator de cobertura e dos coeficientes da MUSLE em microbacias no semiárido brasileiro. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* 18:1157–1164. doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n11p1157-1164>
- SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS DO RIO GRANDE DO NORTE (SEMARH) (2015). Disponível em: <http://sistemas.searh.rn.gov.br/MonitoramentoVolumetrico/Monitoramento/FichaTecnica?idReservatorio=1064>. Acesso em 24 de Abril de 2015.
- Serpa D, Nunes JP, Santos J, et al (2015) Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Sci Total Environ* 538:64–77. doi: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.033
- Silva GF da., Santos D, Silva AP da., Souza JM de. (2015) Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. *Rev Caatinga* 28:25–35.
- Thornton JA, Rast W (1993) A test of hypotheses relating to the comparative limnology and assessment of eutrophication in semi-arid man-made lakes. In: Straskraba M, Tundise JG, Duncan A (eds) *Comparative Reservoir Limnology and Water Quality Management*. Kluwer Academic Publishers, London, pp 1–24
- Thothong W, Huon S, Janeau J-L, et al (2011) Impact of land use change and rainfall on sediment and carbon accumulation in a water reservoir of North Thailand. *Agric Ecosyst Environ* 140:521–533. doi: 10.1016/j.agee.2011.02.006
- Trolle D, Hamilton DP, Pilditch CA, et al (2011) Predicting the effects of climate change on trophic status of three morphologically varying lakes: Implications for lake restoration and management. *Environ Model Softw* 26:354–370. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.08.009
- Tu J (2009) Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. *J Hydrol* 379:268–283. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.10.009
- Valderrama JC (1981) The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters. *Mar Chem* 10:109–122. doi: 10.1016/0304-4203(81)90027-X
- Vidal TF, Neto JC (2014) Dinâmica de nitrogênio e fósforo em reservatório na região semiárida utilizando balanço de massa. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient* 18:402–407.
- Von Sperling M (2005) *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*, 3rd edn. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte

- Wen Y, Khosrowpanah S, Heitz L (2011) Land cover change of watersheds in Southern Guam from 1973 to 2001. *Environ Monit Assess* 179:521–529. doi: 10.1007/s10661-010-1760-5
- Wilson CO, Weng Q (2011) Simulating the impacts of future land use and climate changes on surface water quality in the Des Plaines River watershed, Chicago Metropolitan Statistical Area, Illinois. *Sci Total Environ* 409:4387–4405. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.07.001
- Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses - a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC
- Xie J, Zhang X, Xu Z, et al (2014) Total phosphorus concentrations in surface water of typical agro- and forest ecosystems in China, 2004–2010. *Front Environ Sci Eng* 8:561–569. doi: 10.1007/s11783-013-0601-5
- Xu Y, Zhang M, Wang L, et al (2011) Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China. *Quat Int* 244:272–279. doi: DOI 10.1016/j.quaint.2011.01.019
- Yihdego Y, Webb JA, Leahy P (2015) Modelling of lake level under climate change conditions: Lake Purrumbete in southeastern Australia. *Environ Earth Sci* 73:3855–3872. doi: DOI 10.1007/s12665-014-3669-8
- Zhang Z, Chen X, Xu C-Y, et al (2015) Examining the influence of river–lake interaction on the drought and water resources in the Poyang Lake basin. *J Hydrol* 522:510–521. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.008
- Zohary T, Ostrovsky I (2011) Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes. *Inl Waters* 1:47–59. doi: 10.5268/IW-1.1.406

## ANEXO

**Tabela A** – Médias anuais dos dados obtidos para o reservatório Passagem das Traíras, de setembro de 2011 a dezembro de 2014.

ANO	P (mm)	Zmax (m)	Vol (m <sup>3</sup> )	T (°C)	OD (mg/L)	Turb (NTU)	Cond (µScm <sup>-1</sup> )	Secchi (m)	pH	SST (mg/L)	SSI (mg/L)	SSO (mg/L)	PT (µgL <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (µgL <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (µgL <sup>-1</sup> )	PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (µgL <sup>-1</sup> )	Chl- <i>a</i> (µgL <sup>-1</sup> )
2011	0,00	12,3	39230831	28,7	7,5	29,2	607,5	0,63	7,98	15,3	0,6	14,7	92,7	79,5	637,5	2,2	55,4
2012	16,7	10,3	19585271	29,8	10,5	32,8	874,3	0,31	8,89	23,8	2,2	21,5	119,3	122,2	1010,7	7,3	156,8
2013	18,8	6,6	5965871	31,1	11,6	37,9	1447,1	0,23	9,20	36,1	7,9	28,2	178,9	159,0	1089,4	5,2	202,1
2014	30,7	4,8	2440025	30,1	11,4	35,5	1911,9	0,24	9,17	41,8	13,0	28,8	293,7	206,8	719,0	16,2	218,2