

ÍNDICE DE QUALIDADE AMBIENTAL APLICADO À ÁREA DE MANANCIAL: SISTEMA LACUSTRE BONFIM/RN

Tiago Pedro Silva da Cunha¹
Estephania Silva Jovino²
Cândida Beatriz Santos Batista³
Karitana Maria de Souza Santos⁴
Ygo Magno de Araújo⁵
Danilo Santos Pureza⁶
Denner Santiago de Sousa⁷
Matheus Natan Ferreira Alves de Sousa⁸
José Arthur do Nascimento Ramalho⁹
Carlos Wilmer Costa¹⁰

RESUMO

As atividades humanas se tornaram a principal força modeladora da biosfera nos últimos dois séculos, superando as influências naturais. Isso resultou em ecossistemas degradados e disfuncionais, prejudicando serviços vitais para o bem-estar humano. A degradação do solo devido ao uso da terra, como agricultura e desmatamento, prejudica a disponibilidade e qualidade da água. O estudo destaca o Índice de Qualidade Ambiental dos Recursos Hídricos (IQA-HIDRO) como uma ferramenta valiosa para avaliar a suscetibilidade dos corpos d'água à contaminação pelo uso e ocupação do solo. Ao aplicar o IQA-HIDRO na Bacia Hidrográfica do Sistema Lacustre Bonfim, localizada na região Nordeste do Brasil, com auxílio de ferramentas SIG, foram identificadas áreas com alta qualidade associadas a vegetação densa, áreas urbanizadas com qualidade intermediária e regiões com degradação severa.

PALAVRAS-CHAVE: Segurança hídrica; Sustentabilidade; Planejamento urbano.

ENVIRONMENTAL QUALITY INDEX APPLIED TO WATERSHED AREA: BONFIM LAKE SYSTEM/RN

ABSTRACT

Human activities have become the main shaping force of the biosphere over the past two centuries, surpassing natural influences. This has resulted in degraded and dysfunctional ecosystems, compromising vital services essential to human well-being. Soil degradation due to land use, such as agriculture and deforestation, affects the availability and quality of water. The study highlights the Water Resources Environmental Quality Index (IQA-HIDRO) as a valuable tool to assess the susceptibility of water bodies to contamination from land use and occupation. By applying the IQA-HIDRO in the Bonfim Lake System Watershed, located in

¹ Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFRN; tiagop.engenharia@gmail.com

² Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFRN; estephaniajovino@gmail.com

³ Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFRN; candida.beatriz13@gmail.com

⁴ Mestre em Arquitetura e Urbanismo – UFRN; karitanasouza@hotmail.com

⁵ Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFRN; ygomagno@hotmail.com

⁶ Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental – UFRN; dsp_7@hotmail.com

⁷ Bacharel em Engenharia Ambiental – UFRN; dennerss84@gmail.com

⁸ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental – UFRN; matheusnatancivil@gmail.com

⁹ Mestre em Engenharia Civil e Ambiental – UFRN; arthur2998@gmail.com

¹⁰ Doutor em Ciências Ambientais – UFRN; carloswilmercosta@gmail.com

the Northeast region of Brazil, with the aid of GIS tools, areas with high quality associated with dense vegetation were identified, as well as urbanized areas with intermediate quality and regions with severe degradation.

KEYWORDS: Water security; Sustainability, Urban planning.

ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL APLICADO A ÁREA DE CUENCA: SISTEMA LACUSTRE BONFIM/RN

RESUMEN

Las actividades humanas se han convertido en la principal fuerza modeladora de la biosfera en los últimos dos siglos, superando las influencias naturales. Esto ha resultado en ecosistemas degradados y disfuncionales, comprometiendo servicios vitales para el bienestar humano. La degradación del suelo debido al uso de la tierra, como la agricultura y la deforestación, afecta la disponibilidad y la calidad del agua. El estudio destaca el Índice de Calidad Ambiental de los Recursos Hídricos (IQA-HIDRO) como una herramienta valiosa para evaluar la susceptibilidad de los cuerpos de agua a la contaminación por el uso y ocupación del suelo. Al aplicar el IQA-HIDRO en la Cuenca Hidrográfica del Sistema Lacustre Bonfim, ubicada en la región Nordeste de Brasil, con la ayuda de herramientas SIG, se identificaron áreas con alta calidad asociadas a vegetación densa, zonas urbanizadas con calidad intermedia y regiones con degradación severa.

PALABRAS-CLAVE: Seguridad hídrica; Sostenibilidad; Planificación urbana.

INTRODUÇÃO

Nos últimos dois séculos, as atividades humanas passaram a ser reconhecidas como a principal força modeladora da biosfera. A ação antrópica, mais do que qualquer força natural, tem sido a principal causa das mudanças contemporâneas nos estados e fluxos da biosfera (PELLIKKA et al., 2018).

Há abundantes evidências de que muitos ecossistemas dominados por populações humanas se tornaram altamente estressados e disfuncionais. Contudo, os serviços fornecidos por esses ecossistemas são extremamente importantes para o bem-estar humano (COSTANZA et al., 2017). Mas, uma vez que esses ecossistemas estão altamente degradados, eles se tornam incapazes de fornecer seus serviços no mesmo nível que forneciam anteriormente. A capacidade do ambiente de sustentar a atividade econômica e a saúde humana está, portanto, sendo reduzida (CARTER et al., 2019).

Dentre os serviços essenciais para a manutenção da vida humana se encontra a ciclagem dos nutrientes do solo. No entanto, as mudanças no uso e cobertura do solo, especialmente o cultivo de terras desmatadas, podem diminuir rapidamente sua qualidade, pois os componentes ecologicamente sensíveis do ecossistema florestal não são capazes de amortecer os efeitos das

práticas agrícolas (SALES et al., 2023). Como resultado, a deterioração severa da qualidade do solo pode levar a degradação permanente de sua produtividade (CHAVES et al., 2017).

Além disso, atividades agrícolas e desmatamento impactam diretamente a disponibilidade hídrica (WWAP, 2015; GRIZZETTI, et al, 2016) e a qualidade das águas superficiais (COSTA et al., 2015) e subterrâneas (PIGA et al., 2017). O desmatamento intensifica processos erosivos (VIJITH e DODGE-WAN, 2019; DORICI et al., 2016) ao remover os elementos que amortecem a velocidade do escoamento superficial (COSTA et al., 2018). A agricultura, por sua vez, é uma das principais responsáveis pelo lançamento de contaminantes em corpos hídricos (CUNHA e CUNHA, 2023).

O processo de urbanização também impõe significativa pressão sobre a qualidade da água dos mananciais, principalmente devido à dispersão de contaminantes advindos de efluentes domésticos e industriais (ALLOUCHE et al., 2017; RASHID et al., 2018; HUANG et al., 2019).

Apesar da percepção e consciência dos impactos ambientais pela ação antrópica estarem em progressiva ascensão na sociedade, os ecossistemas continuarão sendo degradados sob pressão de demandas humanas crescentes, a menos que estratégias preventivas e restaurativas sejam aplicadas para alcançar a saúde e integridade dos ecossistemas regionais, especialmente aqueles associados aos recursos hídricos.

Para tanto, tomadores de decisão, nos níveis público e privado, bem com profissionais que lidam com questões ambientais, precisam de informações úteis e diretrizes técnicas geradas a partir de modelos geoambientais implementados em ambiente SIG (COSTA et al., 2018) que avaliam os riscos e benefícios potenciais das opções de gerenciamento de uso do solo (EASTBURN et al., 2017).

Diante disto, a integração de dados de Sensoriamento Remoto e SIG facilitam o desenvolvimento de indicadores de mudança em um ecossistema. O Índice de Qualidade Ambiental dos Recursos Hídricos (IQA-HIDRO) constitui importante ferramenta para gestão e controle ambiental em bacias hidrográficas, pois reflete a suscetibilidade dos corpos hídricos em relação à distância das fontes impactantes associadas ao uso do solo.

O IQA-HIDRO tem sido aplicado a áreas de manancial a fim de diagnosticar preliminarmente impactos negativos derivados da interferência antrópica na qualidade dos

recursos hídricos, facilitando assim, ações de gestão no uso racional do solo (SILVA et al., 2017; MAZZUCO et al., 2017; MAZZUCO e LORANDI, 2018).

Esse tipo de estudo tem maior relevância em regiões onde as interferências climáticas, principalmente nos períodos de seca, intensificam os problemas decorrentes dos processos antrópicos nos corpos e ecossistemas aquáticos, o que pode ser observado nitidamente na piora da qualidade dos recursos hídricos utilizados para o abastecimento humano.

O Nordeste do Brasil tem experimentado nos últimos anos (2012 a 2017) um período de seca severa (SANTOS et al., 2019). Além disso, o aumento dos processos erosivos, desmatamentos, carreamento de nutrientes e micropoluentes aceleram a eutrofização desses mananciais. Entretanto, nessa área têm-se poucos estudos acerca da utilização do IQA-HIDRO no que diz respeito a mananciais utilizados para sistema de abastecimento.

Nesse estado, a Bacia Hidrográfica do Sistema Lacustre Bonfim (BHSLB) é utilizada como fonte de abastecimento humano para cidades interioranas, 32 municípios e 164 comunidades rurais, atendendo uma população estimada em 266.879 habitantes.

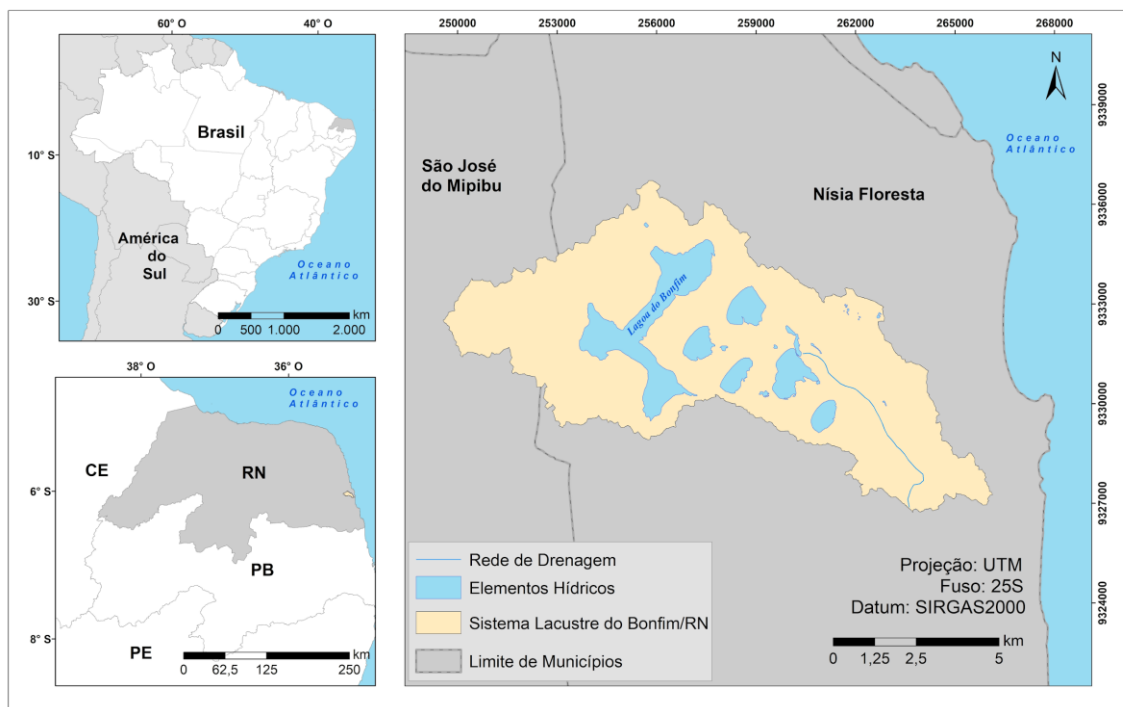
Apesar de sua importância para o abastecimento humano, a BHSLB vem sofrendo severa pressão antrópica. Além da crescente urbanização, a atividade agropecuária tem comprometido a qualidade do solo, o que aumenta o potencial do solo em comprometer a qualidade da água (MATA et al., 2021).

A fim de verificar a magnitude das interferências antrópicas e subsidiar, por meio de informações técnicas, eventuais ações de planejamento territorial, este trabalho tem como objetivo analisar a suscetibilidade dos recursos hídricos do Sistema Lacustre Bonfim por meio da aplicação do IQA-HIDRO.

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL

A BHSLB está localizada na faixa costeira oriental do estado do Rio Grande do Norte (Figura 1), abrangendo área de 72,2 km² entre os municípios de São José do Mipibu (39.776 hab.) e Nísia Floresta (23.784 hab.).

Figura 1 - Localização da BHSLB.



Fonte: Elaboração própria.

As lagoas Redonda, Urubu, Boa Água, Ferreira Grande, Carcará e Bonfim integram o SLB, sendo essa última o maior reservatório da região litorânea oriental do estado e onde são realizadas as captações superficiais (PEREIRA, 2004).

O sistema lacustre está inserido nas Zonas Especiais de Proteção Ambiental (ZPA's) do município de Nísia Floresta, de acordo com o Plano Diretor vigente, estando ainda inserido na APA Bonfim-Guaraíra, criada pelo Decreto Estadual N° 14.369 de 22 de março de 1999.

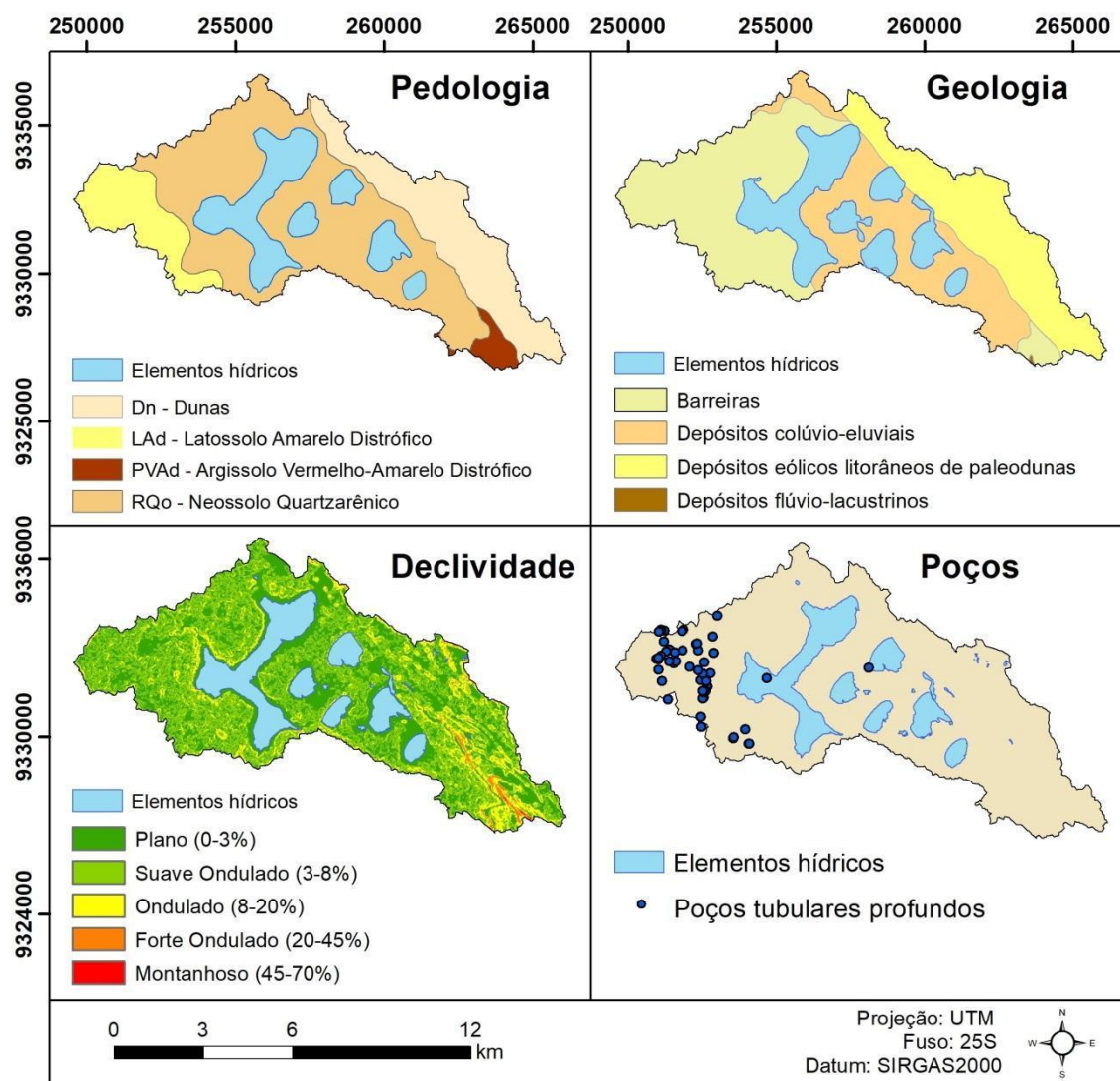
O município de Nísia Floresta iniciou em 2019 o processo para a atualização e revisão da legislação municipal do uso e ocupação do solo, plano diretor, código de obras e posturas e código de meio ambiente. No processo de revisão legal, a realização do diagnóstico técnico-participativo dos aspectos socioeconômico, urbanístico, ambiental e paisagístico, dentre outros, fundamentam as tomadas de decisões para o ordenamento territorial.

O manancial fornece água para o sistema Adutor Agreste-Trairi-Potengi com 300 km de extensão, possuindo cerca de 84 milhões de m³ de armazenamento de água. Apresenta uma área hidráulica de 9 km² e cota de 33 m. Em maio de 2024, sua capacidade estava em 54,28%

(45.743.628 m³) (SEMARH, 2024). A adutora Monsenhor Expedito capta vazão de 1.628 m³/h, sendo 35% do manancial superficial e 65% de poços.

Na Figura 2, na forma de planos de informação, é apresentada a distribuição espacial de atributos do meio físico, como tipos de solos, formações geológicas, relevo e poços profundos.

Figura 2 - Atributos geoambientais.



Fonte: Elaboração própria.

A região possui um clima tropical chuvoso com precipitação pluviométrica média anual de 1.273,8 mm. O período chuvoso compreende os meses de março a agosto, outono-inverno, e o período de seca os meses de setembro a fevereiro, verão. As temperaturas médias anuais

são de 27,1 °C, com máximas e mínimas de 30,0 °C e 21,0 °C, respectivamente (CASTRO et. al., 2014).

O relevo é caracterizado por terrenos baixos e planos com altitude menor que 100 m (IBGE, 2009), enquadrando-se nos chamados Vales Úmidos, denominação adotada pelos órgãos governamentais para caracterizar os aquíferos da faixa costeira oriental do RN com clima tropical úmido (GEBER et al., 2009).

A região apresenta vegetação marcada por formações litorâneas relacionadas à mata atlântica, além dos manguezais, característicos da região (PAIVA et al., 2022). O remanescente da mata atlântica possui uma grande importância ecológica, pois se trata de um elemento fundamental para a proteção hídrica da região.

A ausência de protuberante rede de drenagem é influência do controle morfotectônico, sugerindo elevada taxa de infiltração e pouca influência do escoamento superficial para as lagoas, demonstrando que o Sistema Lacustre do Bonfim apresenta alimentação preponderantemente subterrânea e atmosférica (PEREIRA et al., 2003).

A Tabela 1 mostra as unidades geológicas da região. Verifica-se a ocorrência de formações sedimentares de elevada capacidade de infiltração e armazenamento de água, desta forma, todo o sistema lacustre do Bonfim está inserido no Aquífero Dunas-Barreiras (ou apenas Aquífero Barreiras, na ausência de Dunas).

Tabela 1 - Unidades geológicas.

Unidades	Período	Características
Depósitos eólicos litorâneos de paleodunas	Neógeno	Areias finas e médias, bem selecionadas recobertas por vegetação
Depósitos flúvio-lacustres		Areias finas, siltes, argilas e material orgânico
Depósito colúvio-eluviais		Sedimentos areno-argilosos, arenosos e conglomeráticos, inconsolidados
Formação Barreiras	Paleógeno	Areias quartzo-feldspáticas claras, de granulação fina e média, intercaladas com argilas e matéria orgânica. Recobrem litotipos do embasamento cristalino pré-cambriano. Representam fácies de um sistema fluvial entrelaçado, transicional para leques aluviais e planícies litorâneas.

Fonte: Elaboração própria.

O solo predominante na região é Neossolo Quartzarênico. Embora possua baixa fertilidade natural, a diversificação do seu uso é nítida, como coqueirais, cana-de-açúcar e

cajeiro (EMBRAPA, 2006). Verifica-se também a presença de pecuária extensiva, pequenas áreas rurais com uso diversificado do solo e chácaras.

MATERIAIS E MÉTODOS

Na Tabela 2 são apresentados os planos de informação e, na Tabela 3, as imagens de satélites orbitais utilizadas na pesquisa. Todos os documentos cartográficos foram reprojetados para o datum SIRGAS2000, Fuso 25S e projeção UTM.

Tabela 2 - Documentos cartográficos.

MAPAS	ESCALA	FONTE
Poços profundos: Nísia Floresta e São José de Mipibu	-	SIAGAS, 2022
Geologia Pedologia	1:500.000	CRPM, 2014 RADAMBRASIL, 1981
Declividade Zonas especiais	1:50.000	MDE – Alos/PALSAR Plano Diretor do Município de Nísia Floresta

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3 - Características das imagens de satélites

SATÉLITE	SENSOR	FONTE	DATA	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)	BANDAS
Alos	PALSAR	Alaska Satellite Facility	09/02/2011	12,5	Banda L
Sentinel-2A	MSI	ESA - Copernicus	03/05/2019	10	RGB 483

Fonte: Elaboração própria.

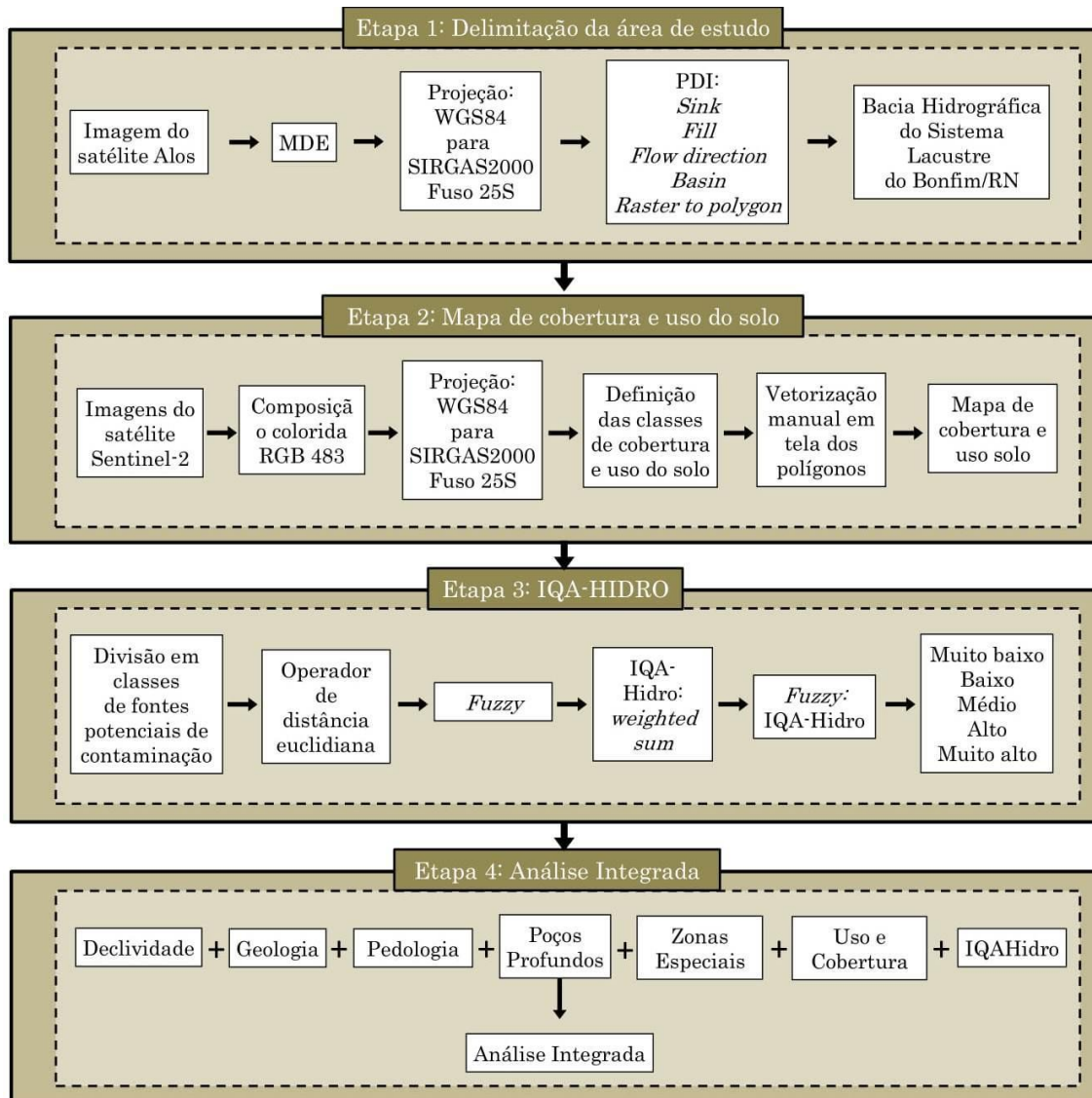
Para a aplicação do IQA-HIDRO na BHSLB, a modelagem ambiental foi dividida em quatro etapas (Figura 3).

A Etapa 1 consistiu na delimitação da área de estudo, cujo delineamento da bacia hidrográfica foi obtido a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) das imagens do Satélite Alos/PALSAR.

A Etapa 2 compreendeu a elaboração do mapa de cobertura e uso do solo a partir das imagens do satélite de sensoriamento remoto Sentinel-2A. Com base no conhecimento da área de estudo e utilizando como pano de fundo as composições coloridas RGB 432, 843 e 483, foi realizada a interpretação dos objetos na superfície terrestre (tonalidade, tamanho, contexto,

forma, textura, padrão, proximidade, localização) (FLORENZANO, 2011), classificação e vetorização manual em tela (heads-up) dos principais tipos de uso.

Figura 3 - Etapas da modelagem ambiental.



Fonte: Elaboração própria.

O aprimoramento do IQA-HIDRO seguiu o princípio original de considerar a distância das fontes impactantes em relação aos recursos hídricos, para verificar a suscetibilidade à contaminação das águas superficiais (EASTMAN, 1997). E, por outro lado, a presença de áreas com vegetação como fator positivo para a conservação dos recursos hídricos (MAZZUCO E LORANDI, 2018).

Para realizar o cálculo do IQA-HIDRO, foi necessário obter a distância euclidiana das fontes impactantes divididas em classes e das áreas vegetadas em relação aos recursos hídricos. Em seguida, tais dados foram reescalados tomando como base a lógica Fuzzy, de tipo linear [$y=f(x)$], assumindo valores de 0 a 1.

Para a aplicação do IQA-HIDRO (Etapa 3), as classes de cobertura e uso do solo foram reclassificadas de acordo com o potencial de contaminação dos recursos hídricos (Tabela 4).

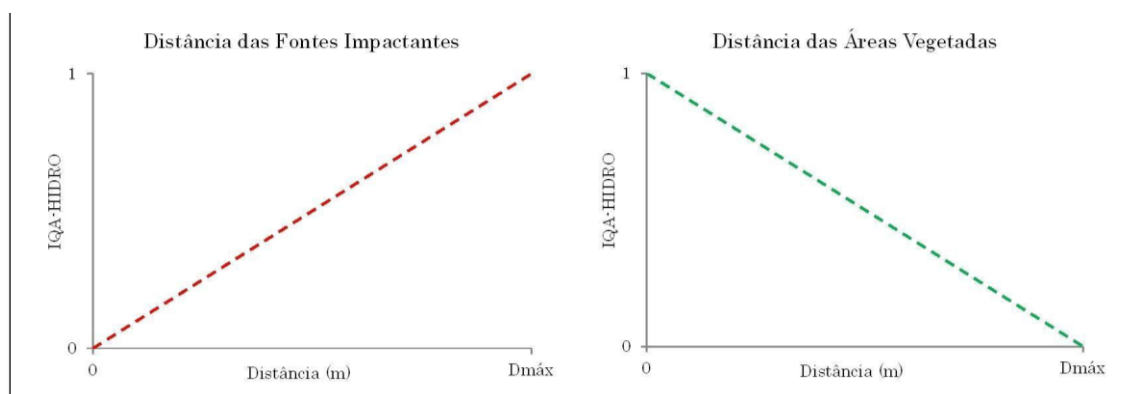
Tabela 4 - Classes dos usos com potencial de contaminação dos recursos hídricos.

BAIXA	MÉDIA	ALTA	MUITO ALTA
Coqueiral	Chácara	Área urbana	Solo exposto em preparo
Lote com vegetação herbácea	Pequenas propriedades rurais com uso agrícola diversificado	Asfalto	Cana
		Condomínio	Indústria
		Pastagem	Posto
		Solo exposto natural	Rodovia
			Estrada de terra

Fonte: Adaptado de Mazzuco e Lorandi, 2018.

Dessa forma, quanto menor for o espaço entre as fontes impactantes e os recursos hídricos, maior será a interferência negativa sobre o cálculo do IQA-HIDRO. Já com relação à distância entre as áreas vegetadas e os recursos hídricos, quanto menor for a distância, maior será a interferência positiva sobre o cálculo do IQA-HIDRO (Figura 4).

Figura 4 - Relação entre susceptibilidade e distância das fontes impactante.



Fonte: adaptado de Eastman, 1997.

Por fim, foi calculada a soma ponderada utilizando a equação 1:

$$IQA - HIDRO = \sum_{i=1}^7 C_i \times P_i \quad (\text{Equação 1})$$

Em que C_i corresponde à classificação dos usos com potencial fonte de contaminação aos recursos hídricos e as três classes de vegetação identificadas; e P_i corresponde aos pesos atribuídos a cada classe, variando de 1 a 4 para as classes dos usos potenciais, sendo 1 menor influência e 4 maior influência negativa na suscetibilidade à degradação do manancial, e as áreas vegetadas variando de 4 a 6, sendo considerada a influência positiva de sua presença (Tabela 4).

Tabela 4 - Ponderação das classes de fontes potenciais a contaminação e áreas vegetadas.

i	CLASSIFICAÇÃO (C)	PESO (P)
1	Baixa	1
2	Média	2
3	Alta	3
4	Muito Alta	4
5	Mata Esparsa	4
6	Mata Densa	5
7	Mata Ciliar	6

Fonte: adaptado de Eastman, 1997.

O resultado para o IQA-HIDRO foi reescalonado tomando como base a lógica Fuzzy e divididos nos seguintes intervalos: Muito Baixo (0,0 – 0,2), Baixo (0,2 – 0,4), Médio (0,4 – 0,6), Alto (0,6 – 0,8) e Muito Alto (0,8 – 1,0). Desta forma, áreas com o grau mínimo de qualidade aproximam-se de 0, enquanto o grau máximo de qualidade é representado por valores próximos de 1.

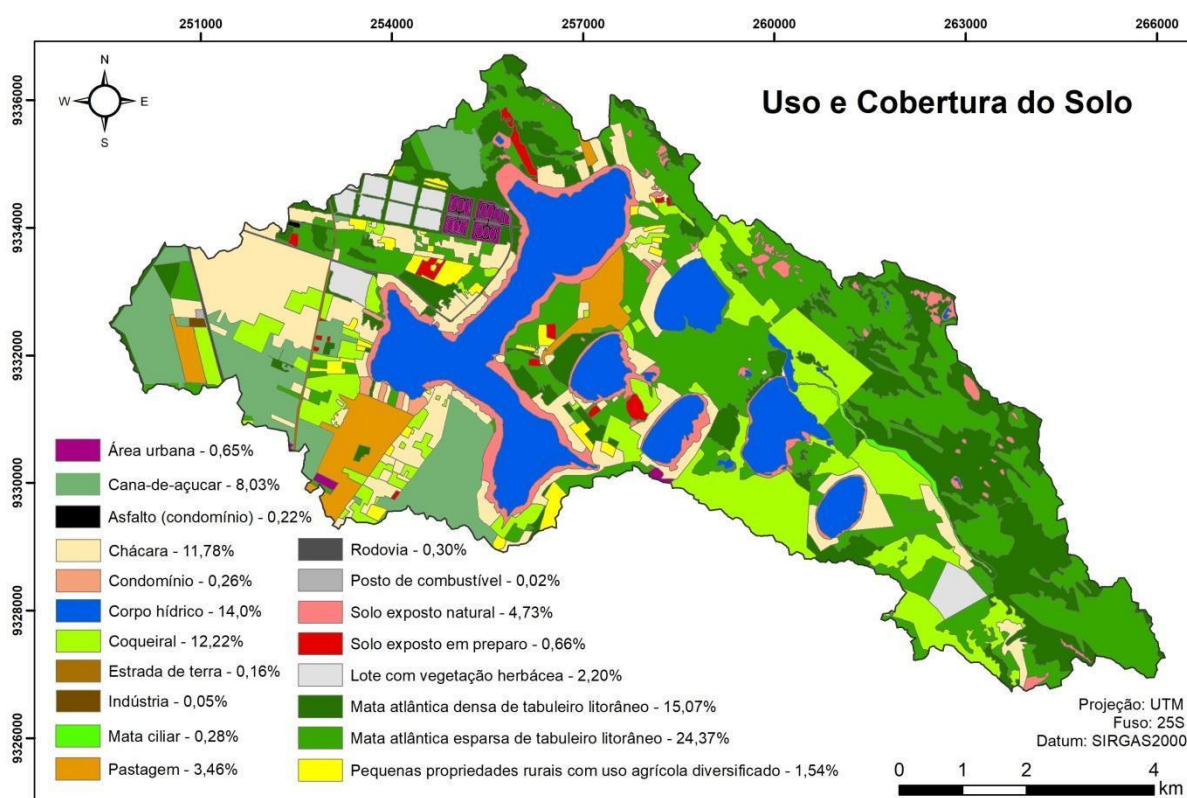
Na Etapa 4, para a análise integrada dos componentes dos meios físico, biótico e antrópico, o IQA-HIDRO foi sobreposto aos planos de informação de geologia, pedologia e declividade, as áreas especiais contidas no Plano Diretor do município de Nísia Floresta e a localização dos poços profundos da BHSLB.

RESULTADOS

O sistema lacustre Bonfim apresenta uma variedade de usos e cobertura do solo. A maior parte da área é ocupada por Mata Atlântica dos Tabuleiros Litorâneos, Mata Ciliar e Corpos Hídricos, abrangendo aproximadamente 38,79 km² (53,72%). Essas áreas desempenham um papel fundamental na preservação ambiental e na manutenção da disponibilidade hídrica (Figura 5).

As atividades antrópicas que incluem áreas industriais, condomínios, postos de combustíveis, estradas de terra, rodovias, chácaras ocupam cerca de 9,7 km² (13,44%) da área. Essas atividades têm o potencial de intensificar os processos erosivos e o assoreamento, bem como podem gerar contaminantes perigosos, causando alterações significativas nas condições naturais de qualidade e quantidade dos corpos hídricos.

Figura 5 - Mapa de uso e cobertura do solo da BHSLB.



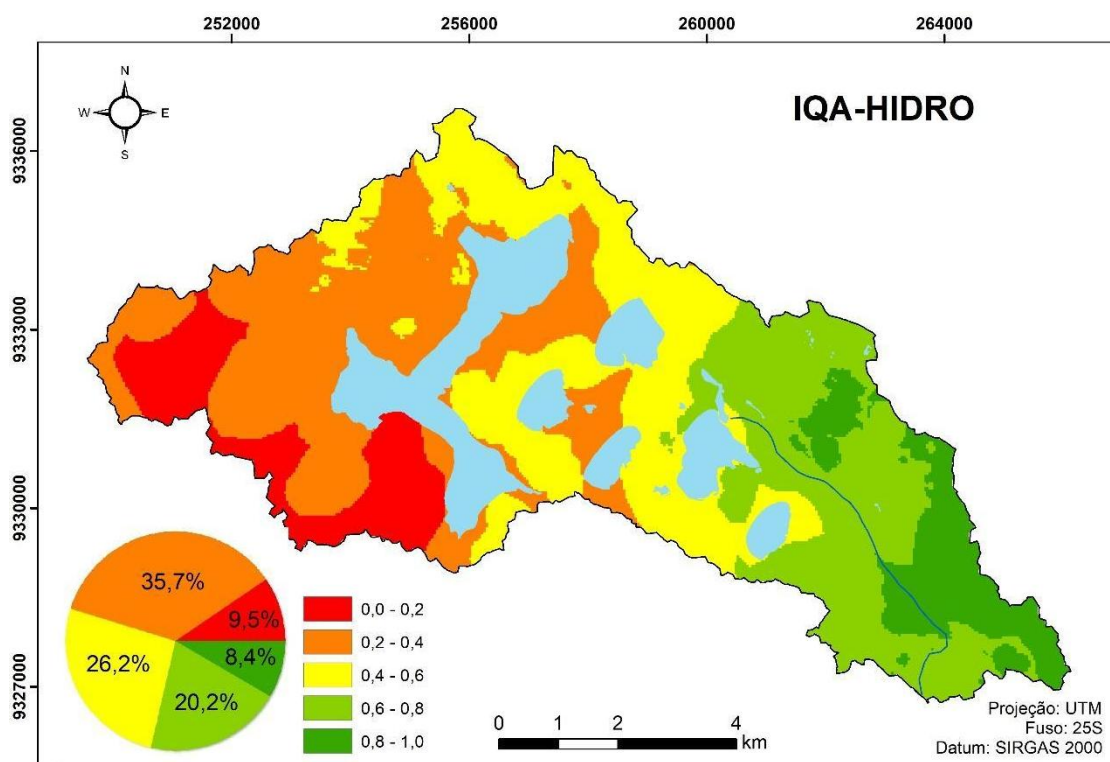
Fonte: Elaboração própria.

Os usos agropecuários ocupam aproximadamente 18,70 km² (25,91%) da bacia (Figura 5). Isso inclui áreas de pastagem para pecuária extensiva, cultivo de cana-de-açúcar e cultivo permanente e intensivo de cocoicultura. Essas atividades contribuem para a fragilidade ambiental, devido à compactação do solo, redução da infiltração de água, aumento do escoamento superficial e intensificação dos processos erosivos, o que pode levar ao assoreamento das lagoas, desequilíbrio das condições hidráulicas, redução a capacidade de armazenamento de água. Além disso, nutrientes utilizados em acesso na agricultura, ou proveniente das fezes animais da atividade pecuarista, podem ser carregados até o manancial, causando o aumento da presença de poluentes químicos e alterações na vida aquática.

É importante destacar que algumas áreas de cultivo permanente e intensivo de cocoicultura apresentam espaçamento mínimo entre as árvores, deixando o solo arenoso e frágil exposto nas entrelinhas, tornando-o mais vulnerável à erosão, todavia este impacto é baixo em comparação às outras atividades agropecuárias. Além disso, a presença de áreas urbanas próximas aos corpos hídricos da bacia também requer atenção, pois a urbanização reduz a cobertura vegetal natural, diminui a infiltração da água da chuva, aumenta o escoamento superficial e contribui para a poluição difusa e concentrada.

Assim, após a sobreposição dos planos de informação de geologia, pedologia e declividade, as áreas especiais contidas no Plano Diretor do município de Nísia Floresta, e o mapa do IQA do Sistema Lacustre Bonfim, constatou-se que as regiões com índices médio, alto e muito alto, ou seja, de 0.4 a 1.0 (verde ao amarelo) encontram-se em áreas com Mata atlântica densa e esparsa principalmente a leste do corpo hídrico, 54,8% da área da bacia (Figura 6).

Figura 6 - Mapa do Índice de Qualidade Ambiental dos Recursos Hídricos.



Fonte: Elaboração própria.

O intervalo do índice que predominou na bacia foi 0.2 e 0.4 (Baixo - cor laranja) equivalente a 35,7%, encontram-se em regiões fortemente antropizadas, marcado por chácaras

e lotes da área urbana, com baixa presença de vegetação, sendo este IQA baixo o que mais está em contato com a Lagoa do Bonfim. Já as regiões de vermelho mais forte (0.0 - 0.2) são as regiões com os piores índices de qualidade a oeste da lagoa principal, onde existe a presença de pastagem e cana de açúcar, atividades com potencial poluidor alto, pouca presença de vegetação e próximos aos recursos hídricos.

DISCUSSÕES

À medida que as cidades expandem, nota-se a invasão das áreas de mananciais, que outrora permaneciam isoladas e distantes da ocupação urbana. Nesse contexto, é de suma importância sensibilizar a população sobre a necessidade de regulamentar e monitorar todas as formas de uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas, especialmente aquelas cujos cursos d'água formam os mananciais que suprem as necessidades da população. Vale ressaltar que todas as atividades desenvolvidas em uma bacia hidrográfica influenciam diretamente a qualidade da água do manancial. A preservação ou degradação desse recurso vai além das ações imediatas em torno do corpo d'água, abrangendo também ações distantes, como atividades industriais com potencial poluente significativo, mesmo que afastadas dos corpos d'água.

É perceptível que a urbanização se expandiu em direção às proximidades da lagoa, acarretando, juntamente com o desmatamento associado, em um possível aumento do escoamento superficial e transporte de nutrientes para o manancial. Além disso, o manancial também é utilizado como área de lazer turístico, com atividades como banhos, o que pode ter impactos sobre a sua qualidade.

É relevante mencionar que sete poços de captação da Adutora Monsenhor Expedito estão localizados em áreas com o menor IQA, o que pode impactar a qualidade da água utilizada por aproximadamente 300 mil pessoas diariamente. Isso ressalta a necessidade de atenção no uso e ocupação do solo, especialmente devido à ocupação urbana inadequada e as atividades de cana de açúcar, favorecendo o escoamento superficial e carreamento de nutrientes para as lagoas, prejudicando a infiltração das águas pluviais, retardando a recarga do aquífero Dunas-Barreiras e contaminando as águas subterrâneas. Além disso, atividades antrópicas, como o cultivo de cana-de-açúcar, áreas de pastagem e outras práticas, podem ter impactos negativos na quantidade e qualidade da água do manancial.

É evidente que as áreas em análise enfrentam uma maior pressão sobre seus recursos hídricos, devido à significativa demanda hídrica potencial do processo de expansão urbana. Isso pode ser agravado caso haja um crescimento emergencial da urbanização, levando a um aumento nas necessidades de água para abastecimento humano e infraestrutura urbana durante períodos de aumento da demanda.

A introdução de medidas de gestão hídrica, como a criação de reservatórios urbanos e sistemas de retenção de água, emerge como estratégias indispensáveis para o armazenamento das águas pluviais, proporcionando uma fonte suplementar para atender às demandas hídricas crescentes das áreas urbanas. Essa abordagem contribui para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos externos e ajuda a enfrentar os desafios da urbanização.

Além disso, é recomendável que os planejadores urbanos e desenvolvedores invistam em tecnologias e infraestruturas que promovam o uso eficiente da água nas áreas urbanas. Sistemas de reuso de água, captação de água da chuva e técnicas de paisagismo sustentável podem contribuir para a redução do consumo de água urbana.

A aplicação de práticas de planejamento urbano sustentável, como o design de bairros com espaços verdes, áreas permeáveis e corredores ecológicos, pode ajudar a preservar a qualidade do ambiente urbano e mitigar os impactos negativos da urbanização sobre os recursos hídricos. Ao integrar essas práticas ao longo do desenvolvimento urbano, é possível alcançar uma expansão urbana mais equilibrada e sustentável, minimizando a pressão sobre os recursos hídricos e garantindo um futuro resiliente para as áreas em crescimento.

CONCLUSÃO

A análise do índice IQA-Hidro proporciona uma visão abrangente do cenário complexo que a região enfrenta. Revela de maneira evidente a notável influência das atividades humanas no manancial, incluindo a pecuária extensiva, o cultivo de cana-de-açúcar, a urbanização e o turismo. Essa análise identifica áreas de considerável importância, que demandam monitoramento constante, com o intuito de assegurar a qualidade da água e a preservação do meio ambiente. A necessidade urgente de implementar um controle e gestão efetivos dos recursos hídricos fica enfaticamente ressaltada.

As áreas situadas a oeste da bacia hidrográfica já apresentam um impacto humano substancial, notadamente contrastando com as matas ciliares que permanecem relativamente preservadas. Isso realça a relevância de adotar medidas robustas para proteger e restaurar as áreas degradadas, simultaneamente enquanto se trabalha para manter a integridade das regiões ainda não afetadas. Em um panorama mais amplo, fica claro que é imperativo enfrentar os desafios impostos pelo processo de expansão urbana nas áreas analisadas, que estão enfrentando uma pressão crescente sobre seus recursos hídricos. A demanda hídrica associada ao rápido crescimento da urbanização pode agravar ainda mais essas pressões, exacerbando as necessidades de água para abastecimento humano e infraestrutura urbana, especialmente em momentos de aumento da demanda.

Acentua-se ainda a necessidade de abordar os desafios impostos pelo processo de expansão urbana que afeta as áreas em análise. Essas regiões enfrentam uma crescente pressão sobre seus recursos hídricos, com a demanda de água associada ao rápido crescimento da urbanização podendo agravar ainda mais essa situação. Essa pressão pode intensificar as necessidades de água para abastecimento humano e para a infraestrutura urbana, especialmente em momentos de elevada demanda.

No âmbito do setor privado, é fundamental compreender as implicações que os empreendimentos urbanos podem ter, considerando o potencial risco das áreas em relação aos recursos hídricos. Essa compreensão não apenas promove a sustentabilidade ambiental, mas também prepara as empresas para enfrentar processos de licenciamento ambiental e obter as devidas autorizações para o uso da água na região.

Além disso, os resultados deste estudo têm implicações significativas em nível estadual e nacional. Eles oferecem subsídios valiosos para o zoneamento dos municípios de Nísia Floresta e São José de Mipibú, orientando a aplicação de políticas públicas de ordenamento territorial de maneira adequada. Mais crucialmente, esses resultados contribuem para aprofundar a compreensão da importância do manancial para o estado do Rio Grande do Norte, especialmente na região do Agreste Potiguar. Eles enfatizam a urgência de adotar medidas para evitar processos erosivos e a degradação ambiental, a fim de proteger a disponibilidade hídrica, especialmente durante períodos de seca severa. A implementação de estratégias de gestão

sustentável é imperativa para garantir um futuro resiliente e equilibrado para essas áreas em rápida transformação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

REFERÊNCIAS

- ALLOUCHE, N., MAANAN, M., GONTARA, M., ROLLO, N., JMAL, I., BOURI, S. A global risk approach to assessing groundwater vulnerability. **Environmental Modelling & Software**, v. 88, p.168-182, 2017.
- CARTER, S. K., FLEISHMAN, E., LEINWAND, I. I. F., FLATHER, C. H., CARR, N. B., FOGARTY, F. A., LEU, M., NOON, B. R., WOHLFEIL, M. E., WOOD, D. J. A.. Quantifying Ecological Integrity of Terrestrial Systems to Inform Management of Multiple-Use Public Lands in the United States. **Environmental Management**, v. 64, n. 1, p.1-19, 2019.
- CASTRO, V. L. L.; CUNHA, M. C. B.; MARTINS, G.; MEDEIROS, R. A. Comportamento do nitrato em poços tubulares no entorno da Lagoa do Bonfim – Nísia Floresta/RN. **Águas Subterrâneas**, [S.L.], 2015. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28315>>.
- CHAVES, H. M. L., LOZADA, C. M. C., GASPAR, R. O. Soil quality index of an Oxisol under different land uses in the Brazilian savannah. **Geoderma Regional**, v. 10, p.183-190, 2017.
- COSTA, C. W., LORANDI, R., LOLLO, J. A., IMANI, M., DUPAS, F. A. Surface runoff and accelerated erosion in a peri-urban wellhead area in southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 5, 2018.
- COSTA, C. W., PIGA, F. G., PRADO DE MORAES, M. C., DORICI, M., SANGUINETTO, E. C., LOLLO, J. A., MOSCHINI, L. E., LORANDI, R., OLIVEIRA, L. J.. Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras - Araras, SP./ Environmental Fragility and water scarcity in catchment basins. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p.946-958, 2015.
- COSTANZA, R., GROOT, R., BRAAT, L., KUBISZEWSKI, I., FIORAMONTI, L., SUTTON, P., FARBER, S., GRASSO, M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?. **Ecosystem Services**, v. 28, p. 1-16, 2017.
- CPRM – Serviço Geológico Do Brasil. Carta Geológica Folha SB.25-Y-A-II E III. Natal. 2014. Escala 1:1.000.000.

CUNHA, G. K. G., CUNHA, K. P. V. Effects of land use changes on the potential for soil to contribute phosphorus loads in watersheds. **Environmental Development**, v. 45, 2023.

DORICI, M., COSTA, C. W., PRADO DE MORAES, M. C., PIGA, F. G., LORANDI, R., LOLLO, J. A., MOSCHINI, L. E. Accelerated erosion in a watershed in the southeastern region of Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 19, 2016.

EASTBURN, D. J., O'GEEN, A. T., TATE, K. W., ROCHE, L. M. Multiple ecosystem services in a working landscape. **Plos One**, v. 12, n. 3, p.1-10, 2017.

EASTMAN, J. R, 1997. Idrisi for Windows. Tutorial Exercises. Version 2.0. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic. Clark University.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2. ed. Brasília, DF. 2006. 286 p. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/338818>>.

FLORENZANO, T. G. Iniciação em sensoriamento remoto. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 123 p.

GEBER, B. D. A., ARAGÃO, J. O., MELO, J. S., SILVA, A. P., GIONGO, P. R., LACERDA, F. F. Relação entre a precipitação do leste do Nordeste do Brasil e a temperatura dos oceanos. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 13, n. 4, p. 462-469, 2009.

GRIZZETTI, B., LANZANOVA, D., LIQUETE, C., REYNAUD, A., CARDOSO, A. C. Assessing water ecosystem services for water resource management. **Environmental Science and Policy**, v. 61, p. 194-203, 2016.

HUANG, Y., QIU, Q., SHENG, Y., MIN, X., CAO, Y.. Exploring the Relationship between Urbanization and the Eco-Environment: A Case Study of Beijing. **Sustainability**, v. 11, n. 22, p.6298-6312, 2019.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual Técnico de Geomorfologia. 2 ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 175p

MATA, A. L. A., MELO, J. F. G., CUNHA, G. K. G., CUNHA, K. P. V. Efeitos da mudança de uso da terra em atributos do solo ripário no nordeste brasileiro. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 27105-27121, 2021.

MAZZUCO, G. G., GONÇALVES, M. P., MIGUEL, B. H., VILLA, M. F. Indicadores de Naturalidade da Paisagem Aplicados no Monitoramento da Qualidade Ambiental de Mananciais (Indicators of landscape naturalness applied for monitoring the environmental quality of water sources). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 5, p.1406-1418, 2017.

- MAZZUCO, G. G.; LORANDI, R. Impactos ambientais negativos das atividades antrópicas na qualidade das águas superficiais da sub-bacia do ribeirão dos toledos: aplicação do IQA-Hidro. In: 8º CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, Coimbra, Portugal, 2018.
- PAIVA, A. M. L., AMARO, V. E., LOLLO, J. A., COSTA, C. W. Fragilidade Ambiental aplicada em área de manancial no Nordeste brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 1, p. 128-147, 2022.
- PELLIKKA, P. K. E., HEIKINHEIMO, V., HIETANEN, J., SCHAFER, E., SILJANDER, M., HEISKANEN, J. Impact of land cover change on aboveground carbon stocks in Afriomontane landscape in Kenya. **Applied Geography**, v. 94, p.178-189, 2018.
- PEREIRA, R. Análise do saldo de fluxo subterrâneo na caracterização hidrológica das lagoas do Sistema Lacustre Bonfim, RN - Brasil. *Holos*, v. 20, p. 34-47, 2004.
- PEREIRA, R., JUNIOR, J. A. G., JUNIOR, G. C. S. Estado da arte da bacia hidrogeológica do sistema lacustre Bonfim-RN, Nordeste do Brasil. *Rev. Águas Subterrâneas*, n.17, p.41-47, 2003.
- PIGA, F. G., TÃO, N. G. R., RUGGIERO, M. H., MARQUEZOLA, D. S., BOINA, W. L. O., COSTA, C. W., LOLLO, J. A., LORANDI, R., MELANDA, E. A., MOSCHINI, L. E. Multi-criteria potential groundwater contamination and human activities: Araras watershed, Brazil. **RBRH**, v. 22, 2017.
- RADAMBRASIL. Secretaria Geral. Ministério das Minas e Energia. Projeto RADAMBRASIL: Folhas SB.24/25 Jaguaribe/Natal; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra (Levantamento de Recursos Naturais). Rio de Janeiro, 1981. 745 p. 23 v.
- RASHID, M. A. U. H., MANZOOR, M. M., MUKHTAR, S. Urbanization and Its Effects on Water Resources: An Exploratory Analysis. **Asian Journal Of Water, Environment And Pollution**, v. 15, n. 1, p.67-74, 2018.
- SALES, M. C. G., CAMPOS, M. C. C., FILHO, E. G. B., PEREIRA, M. G., JÚNIOR, W. F. S., ALVES, D. M. S., DIAS, B. O. Impacto do uso da terra sobre a produção de serapilheira no contexto socioambiental da Amazônia. **Revista Valore**, v. 8, 2023.
- SANTOS, S. R. Q., CUNHA, A. P. M. A., RIBEIRO-NETO, G. G. Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no nordeste do Brasil. **Revista brasileira de climatologia**, v. 25, 2019.
- SEMARH – Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte. Boletim Diário de Monitoramento Hidrometeorológico. Boletim Diário nº 153. 2024.

Disponível em:
<<http://adcon.rn.gov.br/ACERVO/semarh/DOC/DOC000000000332743.PDF>>. Acesso em: 1
maio 2025.

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, 2022. Disponível em:
<<https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/>>. Acesso em outubro 2022.

SILVA, F. L., OLIVEIRA, E. Z., PICHARILLO, C., RUGGIERO, M. H., COSTA, C. W.,
MOSCHINI, L. E. Landscape naturalness verified by environmental indicators: Monjolinho
River manantial, São Carlos-SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p.970-
980, 2017.

SOUZA, B., KOTSUBO, K., FRACACIO, G., TREVISAN, D., CASSIANO, A. M.,
MOSCHINI, L. E., CATOJO, A. M. Z. Avaliação da qualidade dos corpos hídricos frente às
ações antrópicas no município de Santa Lúcia-SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.
10, n. 1, p. 317-331, 2017.

VIJITH, H., DODGE-WAN, D. Modelling terrain erosion susceptibility of logged and
regenerated forested region in northern Borneo through the Analytical Hierarchy Process
(AHP) and GIS techniques. **Geoenvironmental Disasters**, v. 6, n. 1, 2019.

WWAP (UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME). Facing the
Challenges: Case Studies and Indicators. Paris: UNESCO, 2015.