

Estudo

Texto recebido em: 10 ago. 2023. Texto aprovado em: 26 jan. 2024.

OLIVEIRA, Leidjane Maria Maciel de; PAIVA, Anderson Luiz Ribeiro de; SANTOS, Ester Milena dos; RODRIGUES JUNIOR, Jocimar Coutinho. Impacto de aspectos ambientais na Região Metropolitana do Recife por meio da integração de dados estatísticos de diferentes sistemas. *Estudos Universitários: revista de cultura, UFPE/Proexc, Recife*, v. 40, n. 2, p. 293-318, jul./dez. 2023.

<https://doi.org/10.51359/2675-7354.2023.259449>

ISSN Edição Digital: 2675-7354



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons
Atribuição 4.0 Internacional.

IMPACTO DE ASPECTOS AMBIENTAIS NA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE POR MEIO DA INTEGRAÇÃO DE DADOS ESTATÍSTICOS DE DIFERENTES SISTEMAS

IMPACT OF ENVIRONMENTAL ASPECTS IN THE RECIFE
METROPOLITAN REGION THROUGH THE INTEGRATION OF
STATISTICAL DATA FROM DIFFERENT SYSTEMS

Leidjane Maria Maciel de Oliveira

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Doutora em Engenharia Civil

E-mail: leidjane.oliveira@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0003-1251-6998>

 <http://lattes.cnpq.br/0036923505084083>

Anderson Luiz Ribeiro de Paiva

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Doutor em Engenharia Civil

E-mail: anderson.paiva@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0003-3475-1454>

 <http://lattes.cnpq.br/8275483858862408>

Ester Milena dos Santos

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente

E-mail: ester.milena@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0001-8937-3767>

 <http://lattes.cnpq.br/3483603199707929>

Jocimar Coutinho Rodrigues Junior

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Mestre em Engenharia Civil

E-mail: jocimar.junior@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0002-4033-3243>

 <http://lattes.cnpq.br/1533295799670248>

Resumo

Dentro das metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 da Organização das Nações Unidas (ONU), aquelas referentes à melhoria da qualidade da água e de controle de poluição nos corpos hídricos encontram dificuldades para serem alcançadas diante das previsões de aumento do crescimento populacional e do avanço urbano como fatores negativos sobre os recursos hídricos. Uma das soluções possíveis vem da gestão dos recursos ambientais, que inclui a aquisição de dados ambientais para gerar informações. Contudo, os aglomerados populacionais brasileiros encontram dificuldades para integrar dados e informações dos seus diferentes sistemas, como os de recursos hídricos, de saneamento básico e de ordenamento territorial. Posto isso, o presente estudo objetiva avaliar a influência de aspectos ambientais na Região Metropolitana do Recife (RMR), por meio do uso de técnicas estatísticas. Neste sentido, investigou-se a relação entre as seguintes variáveis: população; coleta de esgoto sanitário; uso e ocupação do solo; e qualidade da água, com dados adquiridos de diferentes instituições brasileiras para os anos de 2001, 2010 e 2019, utilizando-se do Coeficiente de Correlação de Pearson (CCP) e da Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH). Constatou-se, a partir das análises, que, mesmo a ampliação da coleta de esgoto sanitário aumentando junto ao crescimento populacional e ao avanço urbano, há poucos resultados na qualidade das águas da região. Além disso, o agrupamento dos municípios resultou em três grupos com diferentes características que devem ser considerados nas ações a serem implementadas para atingir a ODS 6 na RMR. Por fim, este estudo contribui com a integração de diferentes dados, possibilitando a geração de informações que permite avaliar a eficácia das ações implementadas e direcionar as futuras a serem adotadas.

Palavras-chave: qualidade da água. saneamento básico. uso e ocupação. impactos ambientais. gestão integrada.

Abstract

Within the goals of the United Nations' Sustainable Development Goals 6 (SDG/UN), those related to the improvement of water quality and pollution

control are difficult to achieve in view of the forecasts of population growth and urban expansion as negative factors on water resources. One of the possible solutions comes from the management of environmental resources, which includes the acquisition of environmental data to generate information. However, Brazilian population clusters encounter difficulties to integrate data information from their different systems such as water resources, basic sanitation, and territorial planning to integrate various informations. That said, this study aims to evaluate the influence of environmental aspects in the Metropolitan Region of Recife using statistical techniques. In this sense, the relationship between the following variables was investigated: population; sewage collection; land use and occupation; and water quality, with data acquired from different Brazilian institutions for the years 2001, 2010 and 2019, using the *Pearson Correlation Coefficient* (PCC) and the *Hierarchical Cluster Analysis* (HCA). From the analysis, it can be inferred that even with the expansion of sanitary sewage collection happening alongside population growth and urban advancement, there are few reflections on the region's water quality. In addition, the grouping of municipalities resulted in three groups with different characteristics that must be considered in the actions that will be implemented. Finally, this study contributes to the integration of various data, enabling the generation of information which allows the proper evaluation of the effectiveness of implemented actions and directing future ones.

Keywords: water quality. basic sanitation. use and occupation. environmental impacts. integrated management.

INTRODUÇÃO

Por volta da década de 1990, o desenvolvimento sustentável, sob a ótica da política ambiental integradora, tornou-se uma das principais soluções para a coexistência do crescimento econômico aliado à conservação do meio ambiente (Cruz *et al.*, 2021). O atual plano mundial de ações em busca desse desenvolvimento, a Agenda

2030¹, apresenta dentre seus objetivos o ODS 6, o qual trata da “garantia da gestão sustentável da água e esgotamento sanitário para todos”, com umas das principais metas envolvendo a melhoria da qualidade da água, por meio da redução da poluição decorrente da eliminação de despejos, além da minimização da liberação de produtos químicos e materiais perigosos nela, até 2030 (ONU, 2018).

Contudo, o alcance dessa meta demonstra-se ambicioso, dado o crescimento populacional e o avanço dos espaços urbanos. Segundo a ONU (2019), é possível que a população urbana mundial chegue a duplicar até 2050, assim, a urbanização será a tendência de transformação do espaço do século XXI. Esses dois aspectos contribuem para a degradação de sistemas hídricos e desafiam diversos setores de serviços urbanos, como o de águas residuárias (World Water Assessment Programme/ONU, 2020). Mundialmente, cerca de 80% do esgoto sanitário é lançado em águas superficiais ou canais de drenagem pluviais, provocando alterações adversas à saúde, aos ecossistemas aquáticos e às sociedades (World Water Assessment Programme/ONU, 2017).

De modo geral, a poluição hídrica advinda do lançamento de efluentes orgânicos resulta em alterações na qualidade da água do corpo hídrico receptor. Mesmo que, em média, esses efluentes sejam compostos por 99,9% de água e 0,1% de sólidos, sendo 75% destes sólidos orgânicos biodegradáveis, uma grande carga orgânica pode desequilibrar o ecossistema aquático (Sperling, 2014; Nuvolari, 2021). Em geral, esse aporte promove o aumento da ativi-

1 A Agenda 2030, projeto da ONU, conta com 17 ODS “para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade” (ONU, 2023).

dade de seres aeróbios² no corpo d'água, provocando déficits de oxigênio dissolvido e o aumento da concentração de nutrientes e de coliformes fecais, afetando, dessa forma, a qualidade da água.

Diferentes metodologias podem ser usadas para a avaliação dessa qualidade, como o monitoramento entendido como processo contínuo de medição e obtenção de um conjunto de parâmetros físicos, químicos e biológicos para a caracterização de um corpo d'água, descrevendo as variações temporais e espaciais influenciadas por fatores internos e externos a ele (Chapman, 1996). Associadas a esse processo, ferramentas de síntese de informações podem ser utilizadas, a exemplo de técnicas de geoprocessamento e estatística, as quais permitem a mensuração do impacto dos aspectos ambientais que afetam a qualidade hídrica (Zhao *et al.*, 2016; Namugize; Jewitt; Graham, 2018; Uddin; Nash; Olbert, 2021).

Na gestão ambiental, os aspectos ambientais compreendem os elementos que interagem com o ambiente provocando algum tipo de alteração (Sánchez, 2013). Os desafios para o alcance da referida meta da ODS 6 podem ser associados a dois aspectos, como as ocupações desordenadas de cidades densamente populosas, que enfrentam dificuldades na implementação de políticas sanitárias, além das ocupações com desenfreadas ações de atividades industriais e agrícolas. Um exemplo disso é a macrorregião brasileira Nordeste, que enfrenta dificuldades territoriais e orçamentárias, resultando na degradação dos corpos d'água, o que interfere negativamente no bem-estar das populações (Moraes *et al.*, 2012).

2 “Que atua ou ocorre somente na presença de oxigênio” (Aeróbico, 2024).

Na macrorregião supracitada, o percentual de área urbanizada é de 6,94%, com densidade populacional de 36,06 hab/km², distribuída de forma irregular e concentrada em áreas costeiras de bioma Mata Atlântica, já bastante degradado. Cidades como Salvador, Fortaleza e Recife possuem um elevado grau de urbanização e densidade demográfica (IBGE, 2019). Quanto à coleta de esgoto sanitário, apenas 60,27% da população brasileira possui esse serviço, sendo os percentuais das regiões Norte e Nordeste de cerca de 22,81% e 38,02%, respectivamente, no ano de 2020 (Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, 2021).

No que se refere à gestão e à administração da água, o Brasil lida com dificuldades para garantir o uso sustentável desse bem em suas regiões, embora apresente um conjunto de leis e políticas públicas consideradas avançadas no plano internacional (Taveira *et al.*, 2023). Há a necessidade de melhorias no planejamento e nas intervenções do setor público, pois a gestão de recursos tem sido prejudicada pela falta de integração entre níveis institucionais, normas e estruturas sociais, capacidade administrativa e interação entre instituições e grupos sociais (Silva *et al.*, 2020). Nesse contexto, uma possibilidade de entender as associações e prioridades pode ser alcançada através da articulação das informações dos sistemas de monitoramento dos recursos hídricos, do saneamento básico e do uso da terra por meio do uso de técnicas estatísticas (Bastos *et al.*, 2018; Pereira; Figueiredo Neto, 2018).

Giri (2020) enfatiza que o uso de diferentes técnicas estatísticas, probabilísticas e de otimização podem auxiliar a prever o padrão ou resultado de variáveis através do entendimento da experiência. Elas também oferecem grandes oportunidades para avaliar, classificar e prever estudos de qualidade ambiental, com métodos

que envolvem árvores de regressão e apresentam bons resultados para estimativa probabilística do estado das águas quanto a fatores antrópicos (Nasir *et al.*, 2022).

Diante disso, esse estudo objetiva avaliar a influência dos aspectos ambientais na Região Metropolitana do Recife (RMR), por meio do uso de técnicas estatísticas de correlação, investigando as possibilidades de relações entre aspectos dos municípios para um melhor direcionamento de programas e planos, quer sejam: população, coleta de esgoto sanitário, uso e ocupação do solo, e qualidade da água para os anos de 2001, 2010 e 2019.

PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

O objeto de análise deste trabalho é a RMR, instituída pela Lei Complementar nº 382/2018 (Pernambuco, 2018). A região, localizada no bioma Mata Atlântica, abriga 44% da população total do estado de Pernambuco, com ambientes costeiros e litorâneos ameaçados pelas pressões antrópicas (IBGE, 2019). No contexto da macrorregião Nordeste, a RMR destaca-se como a região com o 2º maior Produto Interno Bruto (PIB) nominal (IBGE, 2019).

A Região abrange 14 municípios pernambucanos (Figura 1), os quais foram utilizados neste artigo para análise do saneamento básico nos corpos hídricos municipais: Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço da Mata. Ademais, a RMR possui

área de 2.770,452 km², cerca de 3.690.547 habitantes, contando com densidade demográfica de 1.460 hab/km² (IBGE, 2012).

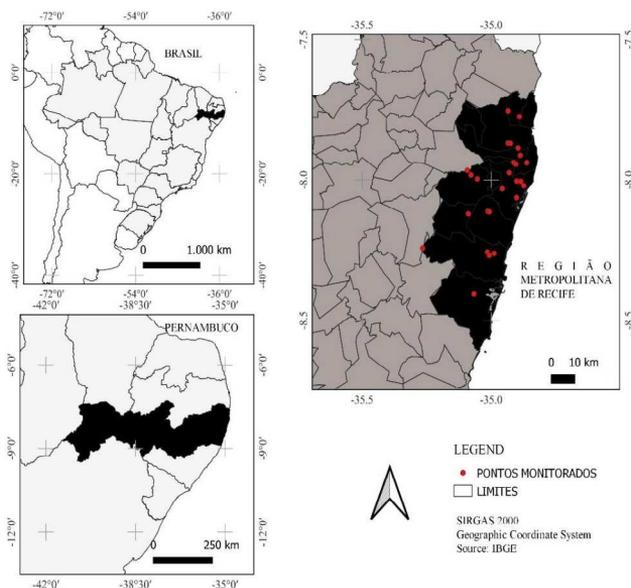


Figura 1. Mapa de localização da RMR e pontos de monitoramento da qualidade da água
Fonte: Os autores (2023).

Foram consultados bancos de dados de instituições nacionais e estaduais para determinar dados populacionais por município, percentuais de esgotamento sanitário e de uso e ocupação da área estudada. Os primeiros dados foram adquiridos do Censo Demográfico de 2000, 2010 e 2020 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Já os percentuais de esgotamento sanitário, para os anos de 2001, 2010 e 2019, foram obtidos do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS). Por fim, os dados de áreas de uso e ocupação referentes aos anos de 2001, 2010 e 2019 foram exportados da Coleção MapBiomas, revelando as classes originais do projeto reorganizadas da seguinte forma: vegetação (formação florestal, formação savânica, mangue, áreas alagadas, outras

formações); agropecuária (pastagem, cana-de-açúcar, mosaico de usos, outras lavouras temporárias); e urbanização.

Já para qualidade das águas, utilizaram-se informações de 26 pontos de monitoramento contínuo, sob a responsabilidade da Agência Estadual de Meio Ambiente (CPRH), para os anos de 2001, 2010 e 2019. O órgão recolhe dados ao menos 4 vezes por ano na RMR e se baseia em oito parâmetros de qualidade da água, sendo estes: Temperatura (TEMP), pH, Turbidez (TURB), Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), amônia (NH_3), fósforo total (P) e Coliformes Termotolerantes (CT). A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva desses parâmetros.

Para a avaliação da qualidade da água utilizou-se o Índice de Qualidade da Água do Conselho de Ministros do Meio Ambiente Canadense (Canadian Council Ministers of the Environment's Water Quality Index - CCME/WQI), empregando a referência do Ministério do Meio Ambiente Canadense (CCME, 2017) para sintetizar os dados dos parâmetros de água em uma única informação dentro de faixas de qualidade. O CCME/WQI varia entre 0 e 100 e pode ser traduzido nas seguintes categorias: excelente (CCME/WQI entre 95 e 100), sendo obtido se todos os valores estiverem dentro dos objetivos durante todo o tempo de observação; bom (CCME/WQI entre 80 e 94), quando as condições raramente afastam-se dos níveis naturais ou desejados; razoável (CCME/WQI entre 65 e 79), em que as condições, às vezes, afastam-se dos níveis naturais ou desejados; ruim (CCME/WQI entre 0 e 44), geralmente afastam-se dos níveis naturais ou desejados.

	TEMP (°C)	pH	TURB (UNT)	OD (mg/L)	DBO (mg/L)	NH ₃ (mg/L)	P (mg/L)	CT (NMP/ 100mL)
2001								
Média	27,25	6,63	44,75	3,77	9,18	2,12	0,43	56.490,64
DP	1,82	0,76	62,23	2,61	13,70	3,31	0,46	67.897,80
Míni- mo	22,00	3,50	5,80	0,00	2,00	0,00	0,04	200,00
Máxi- mo	31,00	10,00	412,00	10,70	87,60	15,00	2,23	160.000 ,00
2010								
Média	27,75	6,62	19,32	3,18	9,36	2,39	0,43	67.580,37
DP	1,97	0,64	15,55	2,58	12,90	3,71	0,43	7.2747,99
Míni- mo	24,00	4,10	3,00	,00	0,50	0,00	0,00	200,00
Máxi- mo	33,00	8,30	90,00	9,80	98,20	15,60	1,91	160.000 ,00
2019								
Média	24,09	6,89	39,07	3,59	15,39	3,74	0,53	48.579,60
DP	1,73	0,40	53,52	2,40	30,68	6,68	0,70	66.816,48
Míni- mo	22,00	5,90	2,00	0,00	0,60	0,00	0,00	100,00
Máxi- mo	29,00	7,80	300,00	7,30	240,00	30,60	3,59	160.000 ,00

DP – desvio padrão; DO – oxigênio dissolvido; DBO – demanda bioquímica de oxigênio; NH₃ – amônia; P – fósforo; CT – coliformes totais.

Tabela 1. Descrição dos parâmetros avaliados para a RMR

Fonte: Os autores (2023).

Como valor de referência para cálculo do CCME/WQI, utilizaram-se os padrões típicos de águas costeiras para estuários apresentados pela CPRH (2021), conforme a Tabela 2.

Parâmetro	Limite	Medida
TEMP	26,0 – 31,0	°C
TURB	< 100	UNT

OD	3,0 – 7,0	mg/L
DBO	< 6,0	mg/L
NH ₃	< 0,015	mg/L
P	0,01-0,1	mg/L
CT	< 1000	mg/L

TEMP – temperatura; TURB – turbidez; OD – oxigênio dissolvido; DBO – demanda bioquímica de oxigênio; NH₃ – amônia; P – fósforo; CT – coliformes totais.

Tabela 2. Limites padrões para a região costeira

Fonte: CPRH (2021).

A partir do cálculo do CCME/WQI para os 26 pontos monitorados, esses valores foram aglomerados por municípios. Essa aglomeração deu-se da seguinte forma: municípios com mais de um ponto monitorado, o valor do índice é a média dos pontos no território; somente um ponto monitorado, o valor do índice representa o município e, caso houvesse pontos de monitoramento na fronteira de municípios, foram computados para ambos os municípios.

A análise envolveu o uso do Coeficiente de Correlação de Pearson (CCP) e da Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH), com apresentações gráficas e tabulares por meio do uso da linguagem de programação *Python* utilizando os seguintes pacotes internos dessa linguagem: *numpy*, *pandas*, *matplotlib*, *seaborn* e *scipy*.

O CCP permite quantificar o grau de associação entre variáveis quantitativas, calculando assim o coeficiente de correlação (Equação 1), cujo resultado, a medida de associação, varia entre 1 e -1. Quanto mais próxima de 1, mais forte é a correlação positiva; quanto mais próxima de -1, mais forte é a correlação negativa; e quanto mais próxima de 0, mais fraca é a correlação (Morettin; Bussab, 2017). Para essa avaliação, adotou-se a seguinte classifica-

ção do valor absoluto da correlação: associação fraca (0,00 a 0,34), associação moderada (0,35 a 0,69) e associação forte (0,70 a 1,00).

$$CORR_{X,Y} = \frac{COV_{X,Y}}{DP_X * DP_Y}$$

Já a AAH envolve a aglomeração sequencial de indivíduos a grupos cada vez maiores considerando algum critério, distância ou dissimilaridade. Para aplicar essa análise os dados foram agregados em relação a média dos três anos por variável e utilizou-se o método de ligação completo, *Complete Linkage*, (Equação 2), junto à métrica de dissimilaridade euclidiana (Equação 3), em que a distância entre dois grupos é dada pela distância máxima entre os seus objetos (Padilha; Carvalho, 2017).

$$d(c_i, c_j) = d(c_a - c_b)$$

$$d(x_i, x_j) = \sqrt{\sum_{l=1}^m (x_{il} - x_{jl})^2}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 detalha os resultados de correlação das seis variáveis utilizadas (população, CCME/WQI, esgoto, vegetação, agropecuária e urbanização) para os resultados dos três anos analisados. Em geral, observou-se que poucas variáveis explicativas se associam como fortes ou moderadas, sendo a única associação forte encontrada entre população e urbanização, enquanto as associações moderadas foram encontradas entre CCME/WQI e população;

CCME/WQI e urbanização; CCME/WQI e coleta de esgoto; coleta de esgoto e urbanização; coleta de esgoto e população; agropecuária e vegetação.

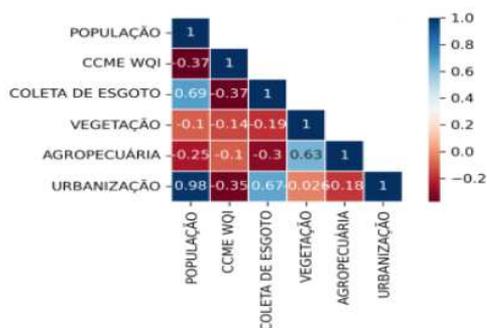


Figura 2. Resultados das correlações para as variáveis explicativas na RMR

Fonte: Os autores (2023).

Obteve-se uma correlação forte positiva entre a população e urbanização (0,98) para a região, evidenciando que elas podem ser diretamente proporcionais, ou seja, à medida que a população aumenta, as áreas urbanas crescem. Dos dados brutos para a população da Região Metropolitana no ano de 2021, a cidade de Recife registrou o maior número, apresentando 1.661.017 habitantes, enquanto o município com menor população, Ilha de Itamaracá, contou com 27.076 habitantes. Em termos de áreas, nos anos de 2011 e 2019, enquanto a região urbana em Recife aumentou de 110.17 km² para 120.35 km², o município de Itapissuma apresentou o menor crescimento urbano, sendo este de 1.42 km² para 3.56 km², para o mesmo período.

Quanto à coleta de esgoto sanitário, conforme observado, houve associação moderada positiva tanto com a urbanização (0,67) quanto com a população (0,69), ou seja, os percentuais de coleta tendem a crescer tanto com o aumento das áreas urbanas quanto

com o número de habitantes. No entanto, na prática, há uma certa preocupação com o andamento das coletas, já que, no ano de 2019, apenas os municípios de Olinda e Recife apresentaram percentuais de coletas acima de 50%, contando com 52,69% e 74,89%, respectivamente. Além disso, os municípios de Ilha de Itamaracá e Itapissuma não possuem coleta de esgotamento sanitário.

Esses baixos percentuais de esgotamento sanitário poderiam refletir na qualidade das águas da RMR, pois indicam que uma maior carga orgânica aporta nos corpos d'águas locais. Contudo, conforme observado na Figura 2, entre coleta de esgoto sanitário e CCME/WQI, a associação é classificada como moderada negativa (-0,37), ou seja, quanto maior a coleta de esgoto, menor a qualidade da água. Ademais, essa associação com a qualidade da água também foi encontrada com a urbanização (-0,36) e com a população (-0,37), o que pode indicar fatores que pressionam a qualidade da água na região, logo indicando que ambientes de alta demografia e urbanização afetam negativamente a qualidade da água.

O fenômeno global da urbanização, característica marcante da RMR, associado ao crescimento econômico promove uma transformação do espaço natural e, portanto, deveria ofertar serviços envoltos em diversos aspectos, englobando os sanitários, para uma melhor qualidade dos recursos locais. No entanto, isso não acontece, já que essa associação, em termos de coleta de esgoto sanitário, mesmo apontando um possível aumento desse serviço com o crescimento populacional e urbano, demonstra uma degradação da qualidade hídrica, dada a relação de oposição com o CCME/WQI.

Corroborando com essa descrição, para o estado de Minas Gerais, Bastos *et al.* (2018) notaram que alguns municípios mineiros, mesmo apresentando uma alta taxa de urbanização e certo

grau de desenvolvimento local, possuíam precários sistema de água e esgoto. Já na pesquisa de Moraes *et al.* (2012), na Região Metropolitana de Salvador observou-se uma dissociação entre qualidade de corpos hídricos e aumento do percentual de coleta de esgoto sanitário, concluindo que, mesmo com os altos investimentos, ainda há uma forte degradação hídrica da região, o que alerta para a importância dos planos e projetos de esgotamento.

Diferentemente dessas variáveis, houve uma correlação moderada positiva entre áreas de atividades agropecuárias e áreas de vegetação (0,63). No entanto, analisando graficamente os dados brutos ao longo dos anos, observa-se que as áreas de vegetação (Figura 3) tenderam a aumentar entre 2001 e 2019, o que não é observado na área de agropecuária (Figura 4), que, para o mesmo período, tendeu a diminuir. Observou-se essa variação em relação a áreas de vegetação em outras regiões metropolitanas no Brasil, utilizando-se de técnicas de sensoriamento remoto diferentes para as análises.

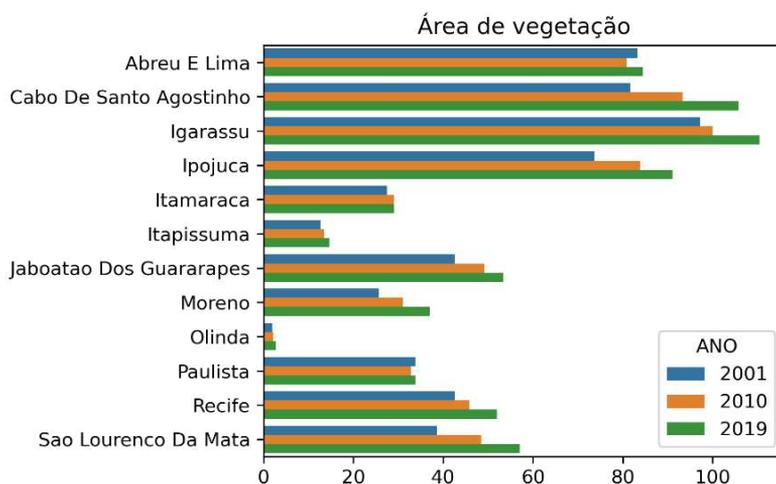


Figura 3. Áreas de vegetação em uso na RMR

Fonte: Os autores (2023).

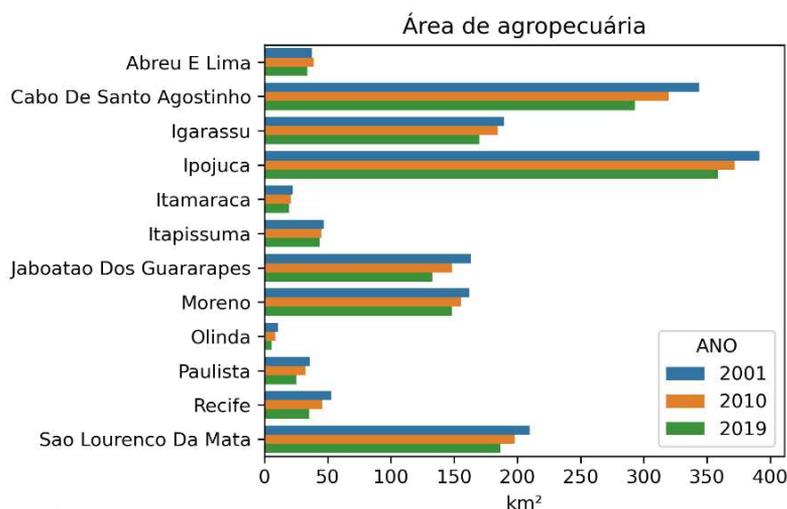


Figura 4. Áreas de agropecuária em uso na RMR

Fonte: Os autores (2023).

Embora tenha realizado uma análise entre os anos de 1990 e 2015, Valenzuela *et al.* (2019) notaram uma redução de áreas associadas à agropecuária e à vegetação, como florestas e mangues, na Região Metropolitana de Aracaju. No entanto, o espaço temporal de 25 anos da análise não permitiu identificar a intensidade dessas mudanças, diferentemente do que foi observado por Gutierrez *et al.* (2021) sobre a Região Metropolitana de Belém, onde, dado o espaço temporal discretizado, uma tendência de estabilização das áreas vegetadas e redução de áreas destinadas a atividades agropecuárias foi verificada.

Na Figura 4 é possível observar os agrupamentos dos municípios resultantes da AAH, dadas as contribuições médias dos três anos das seis variáveis analisadas e, a partir dessa análise, alguns grupos foram formados conforme a similaridade entre seus componentes. Optou-se pela separação em três grupos distintos de municípios, sendo o primeiro formado somente pela capital,

Recife; o segundo abrangendo os municípios de Itapissuma, Ilha de Itamaracá, Moreno, São Lourenço da Mata, Igarassu, Abreu e Lima, Ipojuca e Cabo de Santo Agostinho; e o terceiro contendo Paulista, Olinda e Jaboatão dos Guararapes.

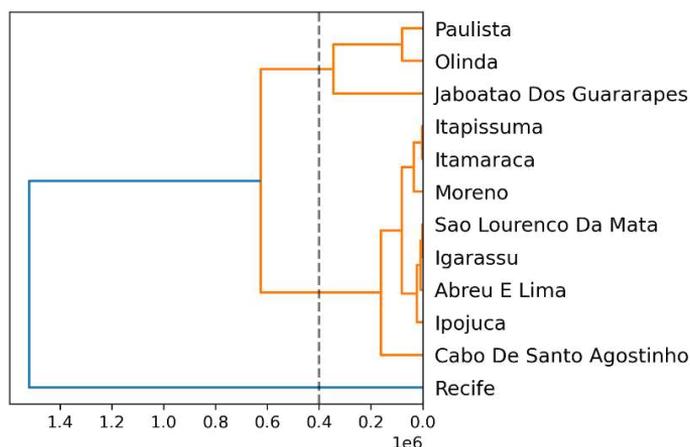


Figura 5. Dendrograma da Análise de Agrupamentos Hierárquicos

Fonte: Os autores (2023).

A Tabela 3 contém informações sobre os três grupos supracitados, determinados a partir da AAH. O primeiro grupo possui o maior aglomerado populacional; o segundo, por outro lado, possui a maior área territorial; enquanto o terceiro possui a maior área total urbana.

	GRUPO 1	GRUPO 2	GRUPO 3
Municípios	Recife	Itapissuma, Ilha de Itamaracá, Moreno, São Lourenço da Mata, Igarassu, Abreu e Lima, Ipojuca e Cabo de Santo Agostinho	Paulista, Olinda e Jaboatão dos Guararapes
População Total (2022)	1.488.920	534.860	1.336.180

% Médio Coleta De Esgoto (2019)	74,89	15,48	37,89
CCME WQI Médio (2019)	18,22	28,52	21,53
Área Territorial - Km ² (2019)	218,43	1.998,74	396,95
Área Total de Vegetação - Km ² (2019)	51,96	529,61	90,03
Área Total Urbana - Km ² (2019)	120,35	112,16	125,01
Área Total Agropecuária - Km ² (2019)	35,59	1.253,81	163,42

Tabela 3. Resumo de informações dos agrupamentos resultados da AAH

Fonte: Os autores (2023).

Ainda sob esse viés dos agrupamentos (Figura 5 e Tabela 3), algumas caracterizações podem ser utilizadas para direcionar o planejamento e a aplicação de políticas públicas concernentes a essas áreas. Quanto ao esgotamento sanitário, Recife possui um dos maiores percentuais em relação à média dos percentuais de outros grupos, porém, esses números não se refletem nos índices de qualidade, os quais, para os três grupos, estão abaixo dos 30%, afastando-se dos valores de referência da Tabela 1.

Outro aspecto a se analisar na Tabela 3 se refere ao uso e à ocupação do solo em relação às classes de áreas de vegetação, urbanização e agropecuária. O território dos municípios que integram o grupo 2, em termos percentuais, possui cerca de 60% dedicado às atividades da agropecuária, diferente da capital Recife, com

quase 55% do território de área urbana, e do grupo 3, que apresenta percentuais equilibrados das classes.

Assim, as políticas de planejamento do uso da terra para os diferentes agrupamentos devem ser associadas a vários aspectos. Áreas que sofrem influência de atividades agropecuárias podem ser impactadas por fontes difusas de poluição de efluentes oriundas do processo produtivo característico de cada uma delas, além de sofrerem com o acréscimo de nutrientes. Freire e Castro (2014) encontraram relação entre áreas de manejo da pecuária bovina com pouco oxigênio dissolvido e altas concentrações de nitratos. Já as áreas urbanas, contribuem com poluição hídrica por matéria orgânica de fontes pontuais de rejeitos domésticos e industriais, resultando, por exemplo, em relações como constatada por Ortega (2017) em um município de São Paulo, onde a demanda biológica de oxigênio (DBO) e as áreas urbanas apresentaram correlação positiva.

Entender os aspectos que influenciam os impactos de cada grupo junto a uma integração de informações pode auxiliar no direcionamento da atuação descentralizadora das instituições reguladoras que, norteadas para as suas respectivas competências de atuação, podem direcionar melhor as soluções, como a operacionalização, a manutenção e a expansão das redes de monitoramento da qualidade de água e o controle de fontes de poluição (Cardoso *et al.*, 2022).

CONCLUSÕES

Esse estudo pretendeu oferecer contribuições sobre a articulação de diferentes variáveis na avaliação dos impactos ambientais na

Região Metropolitana do Recife provocados por diferentes aspectos ambientais que foram associados por técnicas estatísticas relacionadas a recursos hídricos, saneamento básico e usos e ocupação da terra. Nessa avaliação, foram investigadas seis variáveis (população, CCME/WQI, esgoto, vegetação, agropecuária e urbanização) por meio do uso de técnicas estáticas de análise de correlação de Pearson (CCP) e Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH). Os dados foram dos anos de 2001, 2010 e 2019.

Dos resultados da correlação, destacam-se: as associações fortes e positivas entre a população e a urbanização; as associações moderadas e positivas entre coleta de esgoto e população, assim como entre coleta de esgoto e urbanização e entre vegetação e agropecuária; e as associações moderadas e negativas entre CCME/WQI e população, CCME/WQI e urbanização, e CCME/WQI e coleta de esgoto.

Esses resultados induzem à percepção de que os investimentos em coleta de esgotamento sanitário não parecem ser eficazes para a redução da degradação das águas dos corpos hídricos da região, graças ao aumento populacional e urbano. Nesse sentido, destaca-se também a associação moderada e positiva entre área de vegetação e agropecuária que diverge do que mostram os resultados absolutos, já que para os três anos analisados há um aumento da área de vegetação e redução de área destinadas a atividades agropecuárias.

Na AAH, três grupos foram formados: grupo 1, com a capital,

Recife; grupo 2, com os municípios de Itapissuma, Ilha de Itamaracá, Moreno, São Lourenço da Mata, Igarassu, Abreu e Lima, Ipojuca e Cabo de Santo Agostinho; e grupo 3, com os municípios de Paulista, Olinda e Jaboatão dos Guararapes. De forma geral, notou-se a necessidade de medidas mais eficazes que reflitam na qualidade da água local, mas, em relação a características de uso e ocupação da terra, os grupos diferem entre si, apresentando o grupo 3 maior área urbana e o grupo 2 uma maior área de atividades agropecuárias.

Por fim, os resultados dessa pesquisa podem auxiliar no direcionamento da elaboração de políticas públicas, já que os responsáveis por tomar decisões poderiam identificar os municípios que necessitam de priorização de ações para a melhoria da qualidade da água. Além disso, a análise integrada pode ser ampliada para envolver outras variáveis socioeconômicas e, no processo de planejamento, ajudar no direcionamento de recursos monetários, melhoria de infraestrutura e educação ambiental nas áreas mais degradadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas aos pesquisadores dos seguintes processos: IBPG-1279-3.01/22 (FACEPE) e 88887.814388/2023-00 (CAPES).

REFERÊNCIAS

- AERÓBICOS. In: *Michaelis*. Editora Melhoramentos, 2024. Disponível em: <https://michaelis.uol.com.br/busca?id=mpQ4>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- BASTOS, S. Q. *et al.* Evidências entre a qualidade das bacias hidrográficas e as características dos municípios de Minas Gerais. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 56, n. 1, p. 143–162, 2018.
- CCME. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life*, Winnipeg, p. 1-5, 2017. Disponível em: <https://prrd.bc.ca/wp-content/uploads/post/prrd-water-quality-database-and-analysis/WQI-Users-Manual-en.pdf>. Acesso em: 7 ago. 2023.
- CARDOSO, A. T. *et al.* Surface water resources of Santa Catarina state's southern region – geochemical background of the coal mining territory. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 27, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220084>. Acesso em: 16 fev. 2024.
- CHAPMAN, D. *Water Quality Assessments: A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. 2. ed. Cambridge: UNESCO, 1996.
- CPRH - Agência Estadual de Meio Ambiente. *Padrões Típicos de Águas Costeiras*. CPRH, 2021. Disponível em: <http://www2.cprh.pe.gov.br/monitoramento-ambiental/qualidade-da-agua/bacias-hidrograficas/indices-e-indicadores/>. Acesso em: 15 maio 2023.
- CRUZ, R. R. *et al.* A sustentabilidade como política pública: conceitos e óticas da política ambiental nacional. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, João Pessoa, v. 8, n. 20, p. 1503-1513, 2021.
- FREIRE, A. P.; CASTRO, E.C. Análise da Correlação do uso e Ocupação do Solo e da Qualidade da Água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.19, p. 41-49, 2014.
- GIRI, Subhasis. Water quality prospective in Twenty First Century: Status of water quality in major river basins, contemporary strategies and impediments: A review. *Environmental Pollution*, [s.l.], v. 271, p. 116332, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116332>. Acesso em: 16 fev. 2024.

GUTIERREZ, C. B. B. *et al.* Dinâmica multitemporal da urbanização na região metropolitana de Belém: evidências de antropismo em um cenário Amazônico. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, [s. l.], v. 12, n. 10, p. 258-272, 2021.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico de 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/pesquisa/23/26170?detalhes=true>. Acesso em: 28 dez. 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Biomass e sistema costeiro-marinho do Brasil*. Brasil: Coordenação de Recursos Naturais - IBGE, v. 45, 2019. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Demográfico de 2022*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe.html>. Acesso em: 16 fev. 2023.

MORAES, L. R. S. *et al.* Saneamento e Qualidade das Águas dos Rios em Salvador, 2007-2009. *Revista Interdisciplinar de Gestão Social*, Salvador, v. 1, n. 1, p. 47-60, 2012. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/rigs/article/view/12067/8615>. Acesso em: 18 maio 2023.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. *Estatística básica*. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

NAMUGIZE, J. N.; JEWITT, G.; GRAHAM, M. Effects of land use and land cover changes on water quality in the uMngeni river catchment, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, [s. l.], v. 105, p. 247-264, jun. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.03.013>. Acesso em: 7 ago. 2023.

NASIR, Nida *et al.* Water quality classification using machine learning algorithms. *Journal of Water Process Engineering*, [s. l.], v. 48, p. 102920, 2022. Acesso em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102920>. Disponível em: 16 fev. 2023.

NUVOLARI, A. *Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola*. [S. l.]: Editora Blucher, 2021.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Universalização do saneamento está lenta demais na maior parte dos países*. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/universalizacao-do-saneamento-esta-lenta-demais-na-maior-parte-dos-paises/>. Acesso em: 7 ago. 2023

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *World population prospects 2019*. [S. l.]: Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais, Dinâmica populacional, 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp2019/>. Acesso em: 28 dez. 2023.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Organização das Nações Unidas Brasil, 2023. Objetivos de desenvolvimento sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 22 dez. 2023.

ORTEGA, D. J. P. *Identificação e avaliação da pressão antrópica no reservatório Barragem Engenheiro Paulo de Paiva Castro: repercussão sobre as águas superficiais da bacia do Rio Juqueri, no município de Mairiporã - SP*. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais na Área de Recursos Hídricos, Manejo e Monitoramento Ambiental) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba, 2017.

PADILHA, V. A.; CARVALHO, A. C. P. de L. F. *Mineração de dados em Python*. São Paulo: Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo, 2017.

PEREIRA, P. V. M.; FIGUEIREDO NETO, L. F. Variáveis socioeconômicas e gastos públicos ambientais dos municípios brasileiros: uma análise no Período de 2005-2015. *Revista de Administração da UFSM*, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 826-842, dez. 2018.

PERNAMBUCO. *Lei Complementar nº 382, de 9 de fevereiro de 2018*. Dispõe sobre a Região Metropolitana do Recife - RMR, para realocar o município de Goiana para a Zona da Mata Norte. Governo do Estado de Pernambuco, Recife, 2018.

SÁNCHEZ, L. E. *Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 583 p.

SILVA, J. *et al. Water sustainability assessment from the perspective of*

sustainable development capitals: Conceptual model and index based on literature review. Journal of Environmental Management, Amsterdã, v. 254, p. 109750, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109750>. Acesso em: 18 jan. 2024.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. BRASIL, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/>. Acesso em: 16 maio 2023.

SPERLING, M. V. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

TAVEIRA, K. *et al.* Gestão dos Recursos Hídricos: uma Revisão sob a Perspectiva dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, Santa Catarina, v. 12, n. 1, p. e12549-e12549, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59306/rgsa.v12e12023e12549>. Acesso em: 18 jan. 2024.

UDDIN, M. G.; NASH, S.; OLBERT, A. I. A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, Oxford, v. 122, p. 107218, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>. Acesso em: 18 jan. 2024.

VALENZUELA, G. B. *et al.* Fragmentação da Paisagem na Região Metropolitana de Aracaju-SE, Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, Uberlândia, v. 71, n. 3, p. 647-678, 2019.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). *Wastewater: The Untapped Resource*. Itália: UNESCO, v. 53, 2017. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247153>. Acesso em: 18 jan. 2024.

WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). *Água e Mudança. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos*, p. 12, 2020.

ZHAO, Q. *et al.* A review of methodologies and success indicators for coastal wetland restoration. *Ecological Indicators*, Oxford, v. 60, p. 442-452, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.003>. Acesso em: 18 jan. 2024.