

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

MARIA LUIZA RAMOS DA SILVA

**BACIAS HIDROGRÁFICAS INTELIGENTES E GESTÃO
SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS: PROPOSTA DE UM
SISTEMA DE APOIO À DECISÃO BASEADO EM INDICADORES**

CAMPINAS

2024

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS
CENTRO DE ECONOMIA E ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM
SUSTENTABILIDADE

MARIA LUIZA RAMOS DA SILVA

BACIAS HIDROGRÁFICAS INTELIGENTES E GESTÃO
SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS: PROPOSTA DE UM
SISTEMA DE APOIO À DECISÃO BASEADO EM INDICADORES

Dissertação apresentada com o propósito de obter o título de mestre no curso de Mestrado em Sustentabilidade, junto ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Sustentabilidade da Escola de Economia e Negócios da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella

CAMPINAS

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S586b	Silva, Maria Luiza Ramos da Bacias hidrográficas inteligentes e gestão sustentável de recursos hídricos: proposta de um sistema de apoio à decisão baseado em indicadores / Maria Luiza Ramos da Silva. - Campinas: PUC-Campinas, 2024. 102 f. Orientador: Orandi Mina Falsarella. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) - Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade, Escola de Economia e Negócios, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2024. Inclui bibliografia. 1. Gestão de recursos hídricos. 2. Bacias hidrográficas inteligentes. 3. Sistemas de apoio à decisão. I. Falsarella, Orandi Mina. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola de Economia e Negócios. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade. III. Título.
-------	--

MARIA LUIZA RAMOS DA SILVA

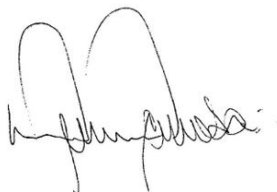
BACIAS HIDROGRÁFICAS INTELIGENTES E GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS: PROPOSTA DE UM SISTEMA DE APOIO À DECISÃO BASEADO EM INDICADORES.

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado em Sustentabilidade da PUC-Campinas, e aprovada pela Banca Examinadora.

APROVADA: 11 de fevereiro de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **ORANDI MINA FALSARELLA**
Data: 10/03/2025 11:01:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Orandi Mina Falsarella
(Orientador- PUC-CAMPINAS)



Prof. Dr. Duarcides Ferreira Mariosa
(PUC-CAMPINAS)



Prof. Dr. Cristiano Capellani Quaresma
(Universidade Nove de Julho - UNINOVE)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Rita de Cássia de Mattos Ramos da Silva e Paulo Cezar da Silva, como uma forma de expressar minha mais profunda gratidão e reconhecimento. Desde o início da minha trajetória, ambos foram pilares fundamentais, proporcionando não apenas o suporte material, mas também o emocional e intelectual necessários para que eu pudesse perseguir meus objetivos. O investimento, o incentivo inabalável e a crença incondicional em meu potencial foram determinantes para que eu superasse desafios e alcançasse cada conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por estar ao meu lado em cada etapa dessa trajetória, provendo força, sabedoria e bênçãos para superar as dificuldades e alcançar esta conquista.

Minha eterna gratidão também vai ao professor Dr. Orandi Mina Falsarella, cuja orientação foi indispensável para a realização deste trabalho. Um mentor extraordinário que me acompanhou por quatro anos, desde as iniciações científicas na graduação, e que sempre terá toda a minha admiração e respeito, sempre compreensivo e disposto a oferecer conselhos valiosos, com paciência e apoio constante.

Agradeço à minha família, minha mãe Rita Ramos, meu pai Paulo Silva, à minha irmã Anna Carolina Ramos e à minha avó Paulina Pagotto, devo um agradecimento especial. O amor, o apoio e a motivação de vocês foram minha base durante essa jornada. Vocês são a minha base e a minha maior referência na vida.

Estendo meu agradecimento aos professores e colegas de sala, em especial os professores Prof. Dr. Duarcides Ferreira Mariosa e Prof. Dr. Diego de Melo Conti que tornaram essa caminhada mais enriquecedora e totalmente possível. Todo o aprendizado e compartilhamento de conteúdos foram fundamentais para meu desenvolvimento pessoal e acadêmico.

Sou grata ainda à Pontifícia Universidade Católica de Campinas (PUC-Campinas), pela formação de qualidade e por manter o compromisso com a ética e a excelência.

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

Por fim, aos demais amigos e familiares, com especial destaque a Carla Murielli, Lorena Bazanelli e Isadora Minuzzi, cuja presença e apoio foram fundamentais ao longo desta jornada, oferecendo incentivo e motivação em momentos cruciais.

EPÍGRAFE

*“O homem não teria alcançado o possível se,
repetidas vezes, não tivesse tentado o
impossível.”*

(Max Weber)

RESUMO

A água é um dos recursos naturais fundamentais para a sobrevivência da humanidade e é no contexto das bacias hidrográficas que se percebe a escassez e a degradação do seu uso, seja pela ausência ou diminuição da precipitação decorrente da chuva, da utilização inadequada e exorbitante ou pela devolução desse bem ao meio ambiente sem o tratamento devido. Um dos fatores importantes para que a água esteja disponível na quantidade e qualidade adequada é a capacidade de gestão dos recursos hídricos. Diante da importância deste recurso, há o Plano de Bacias Hidrográficas (PBH), um instrumento central da gestão hídrica, que aponta diretrizes a partir da disponibilidade hídrica e da qualidade da água, apresentando metas de curto, médio e longo prazos para se atingir índices progressivos de recuperação, proteção e conservação dos recursos hídricos. Mas para que sejam avaliadas as metas e ações do PBH é necessário o uso de indicadores bem definidos e calculados, com o apoio das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), uma vez que essas tecnologias podem auxiliar na coleta dos dados em tempo real e no tratamento para que se tornem informações relevantes, de modo a permitir análises detalhadas de diversos pontos da bacia hidrográfica e, assim, levantar informações quanto à efetividade das metas e ações estabelecidas, além de realizar previsões para que haja um planejamento prévio de medidas a serem tomadas. Assim, o objetivo desse projeto de pesquisa é explorar possibilidades de um Sistema de Apoio à Decisão (SAD) para a gestão sustentável de recursos hídricos aplicado aos planos de bacias hidrográficas que se baseia em indicadores, cuja coleta de dados, cálculo e análise é auxiliado por TIC inovadoras propondo um modelo teórico que poderia ser desenvolvido em pesquisas futuras. Com relação a abordagem metodológica, a pesquisa se caracteriza como básica, exploratória e de natureza qualitativa. Como resultado, foi desenvolvida uma proposta de SAD que integra tecnologias avançadas de coleta e monitoramento, como sensoramento remoto e redes de sensores IoT, para auxiliar na avaliação da efetividade das metas e ações dos Planos de Bacias Hidrográficas. A coleta abrangente e precisa dos dados ambientais, aliada à análise de indicadores por meio de Big Data e Inteligência Artificial, fornece subsídios essenciais para o planejamento e a gestão hídrica, que em conjunto à tecnologia Blockchain garante confiabilidade das informações geradas e registradas. Por meio de *dashboards* interativos, o SAD permite a visualização em tempo real, capaz de auxiliar na avaliação da efetividade das ações e metas estabelecidas nos PBH, apoiando o processo decisório estratégico dos gestores e alinhando-se aos objetivos do Plano de Bacias. Como forma de demonstrar o SAD proposto, ele foi aplicado de maneira teórica às ações do Plano de Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí. Como conclusões, o estudo demonstrou que a proposta de SAD com a integração de tecnologias emergentes tem a capacidade de monitorar indicadores, avaliar a efetividade das ações propostas e identificar parâmetros críticos relacionados à qualidade da água e à gestão dos recursos hídricos. A aplicação teórica em ações do PBH PCJ evidenciou o potencial do sistema em apoiar a tomada de decisões estratégicas, promovendo uma gestão mais eficiente e integrada, além de contribuir para o cumprimento de metas de sustentabilidade e segurança hídrica previstos nos PBH em alinhamento com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 proposto pela Organização das Nações Unidas.

Palavras-chave: Gestão de recursos hídricos; Bacias hidrográficas inteligentes; Indicadores; Plano de Bacias Hidrográficas; Sistemas de apoio à decisão.

ABSTRACT

Water is one of the essential natural resources for human survival, and it is within the context of river basins that the scarcity and degradation of its usage become apparent, whether due to a lack or reduction in rainfall, excessive and improper use, or the return of untreated water to the environment. One critical factor in ensuring that water is available in the appropriate quantity and quality is the effective management of water resources. In light of the importance of this resource, the River Basin Plan (PBH) serves as a central instrument of water management, providing guidelines based on water availability and quality, with short-, medium-, and long-term goals to achieve progressive rates of recovery, protection, and conservation of water resources. However, in order to assess the PBH goals and actions, it is necessary to use well-defined and calculated indicators, supported by Information and Communication Technologies (ICT), as these technologies can aid in real-time data collection and processing, transforming it into relevant information. This approach allows for detailed analyses of various points within the watershed, thus providing insights into the effectiveness of the established goals and actions, in addition to making forecasts that enable preemptive planning for future measures. Thus, the aim of this research project is to explore the possibilities of a Decision Support System (DSS) for the sustainable management of water resources applied to river basin plans that is based on indicators, whose data collection, calculation and analysis is aided by innovative ICT, proposing a theoretical model that could be developed in future research. In terms of methodological approach, the research is characterized as basic, exploratory, and qualitative. As a result, a DSS proposal was developed that integrates advanced monitoring technologies, such as remote sensing and IoT sensor networks, to aid in evaluating the effectiveness of the goals and actions of River Basin Plans. The comprehensive and accurate collection of environmental data, combined with the analysis of indicators using Big Data and Artificial Intelligence, provides essential input for water planning and management, which in conjunction with Blockchain technology guarantees the reliability of the information generated and recorded. Through interactive dashboards, the SAD enables real-time visualisation, capable of helping to assess the effectiveness of the actions and targets established in the PBH, supporting the strategic decision-making process of managers and aligning with the objectives of the Basin Plan. In order to demonstrate the proposed DSS, it was applied in a theoretical approach to the actions of the Piracicaba, Capivari and Jundiaí River Basin Plan. In conclusion, the study demonstrated that the proposed DSS with the integration of emerging technologies has the capacity to monitor indicators, evaluate the effectiveness of proposed actions and identify critical parameters related to water quality and water resource management. The theoretical application to actions in the PBH PCJ showed the system's potential to support strategic decision-making, promoting more efficient and integrated management, as well as contributing to the fulfilment of the sustainability and water security goals set out in the PBH in line with Sustainable Development Goal 6 proposed by the United Nations.

Keywords: Water resources management; Smart watersheds; River Basin Plan; Indicators; Decision support systems.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Elementos básicos de SAD com técnica de RBC.....	29
Quadro 2 – Plano de Ações em Tema Estratégico, Eixos e Programas e número de ações do PRH PCJ 2020 a 2035.....	42
Quadro 3 – Ações elegíveis e prioridade do PRH PCJ 2020 a 2035.....	45
Quadro 4 – Comunicação dos resultados do PBH e acompanhamento pelos atores responsáveis.	54
Quadro 5 - Combinação de palavras para busca de estudos relacionados a Bacias Hidrográficas e gestão dos recursos hídricos.....	58
Quadro 6 - Combinação de palavras para busca de estudos relacionados a Indicadores.....	58
Quadro 7 - Combinação de palavras para busca de estudos relacionados à TIC.....	59
Quadro 8 - Combinação de palavras para busca de estudos relacionados à TIC.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo Conceitual de Sistema de Apoio à Decisão para monitoramento de Plano de Bacias Hidrográficas

64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CBH PCJ: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí

CBH: Comitê das Bacias Hidrográficas

CEEIBH: Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas

CNARH: Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos

CNRH: Conselho Nacional de Recursos Hídricos

ETA: Estação de Tratamento de Água

ETE: Estação de Tratamento de Esgoto

IDW: *Inverse Distance Weighting*

IoT: *Internet of Things*

IQA: Índice de Qualidade da Água

LABSID: Laboratório de Sistema de Apoio a Decisão da Escola Politécnica da USP

NSF: *National Sanitation Foundation*

ODS: Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis

PaaS: *Platform as a Service*

PNRH: Política Nacional de Recursos Hídricos

PRH PCJ: Plano de Recursos Hídricos das Bacias das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí

PRH: Plano de Recursos Hídricos

RA: Realidade Aumentada

RBC: Raciocínio Baseado em Casos

RNA: Redes Neurais Artificiais

RV: Realidade Virtual

SaaS: *Software as a Service*

SAD: Sistemas de Apoio à Decisão

SADGA: Sistemas de Apoio à Decisão para a Gestão Ambiental

SAR: Sistema de Acompanhamento de Reservatórios

SciELO: *Scientific Eletronic Library Online*

SGBD: Sistema Gerenciador de Banco de Dados

SI: Sistemas de Informação

SIG: Sistemas de Informação Gerenciais

SINGREH: Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SNIRH: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

SPT: Sistemas de Processamento de Transações

SRH: Secretaria de Recursos Hídricos

SSD PCJ: Sistema de Suporte à Decisão das Bacias das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí

TI: Tecnologia da Informação

TIC: Tecnologias da Informação e Comunicação

SUMÁRIO

1. Introdução	12
1.1. Contextualização do problema	12
1.2. Objetivos do trabalho	16
1.3. Justificativa	17
1.4. Estrutura do trabalho	18
2. Fundamentação teórica	19
2.1. Bacias hidrográficas e gestão de recursos hídricos	19
2.1.1. Conceitos e definições bacias hidrográficas	19
2.1.2. Conceitos e definições de Gestão de recursos hídricos	20
2.2. Indicadores	24
2.3. Tecnologias da informação e comunicação	28
2.3.1. Sistemas de informação e de apoio à decisão	28
2.3.2. Tecnologias inovadoras	32
2.4. Plano de bacias hidrográficas	42
2.4.1. Conceitos e legislação	42
2.4.2. Plano de Bacias Hidrográficas PCJ	45
2.4.3. Sistemas de informações sobre recursos hídricos nas bacias PCJ	55
3. Metodologia da pesquisa	60
3.1. Delineamento da Pesquisa	60
3.2. Protocolo para coleta de dados	61
3.3. Desenvolvimento da pesquisa	64
4. Proposta de SAD aplicado a Plano de bacias hidrográficas	67
4.1. Proposta do Sistema de Apoio à Decisão	67
4.1.1. Coleta de dados	69
4.1.2. Cálculo de indicadores e análise de dados	72
4.1.3. Diagnóstico do Plano de Bacias Hidrográficas e Projeção dos resultados através de dashboards	73
4.2. Aplicação do SAD proposto junto a ações do Plano de Bacias PCJ	74
4.2.1. Enquadramento dos Corpos d'Água Superficiais: 1.2.1 "Melhoria e recuperação da qualidade das águas"	75
4.2.2. Águas Subterrâneas: 3.2.1 - Realizar os procedimentos estabelecidos para as áreas de restrição e controle já identificadas nas Bacias PCJ e avaliar a existência de novas áreas	77
5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	81
6. Referências bibliográficas	85

1. Introdução

1.1. Contextualização do problema

Um dos fatores indispensáveis e essenciais para a sobrevivência dos seres vivos e todas as atividades existentes da sociedade é a água, que apesar de extremamente consumida, trata-se de um bem escasso e finito (BEZERRA et al., 2019), o que torna fundamental a busca por uma gestão sustentável dos recursos hídricos e das bacias hidrográficas de maneira a atender a demanda populacional à medida que respeita seu ciclo natural de restauração.

A preocupação com a água faz parte das discussões da ONU, que incluiu entre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) o Objetivo 6, que consiste em estabelecer um compromisso ao assegurar a disponibilidade, qualidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos, porém, o esgotamento dos recursos naturais e os impactos negativos da degradação ambiental, como a desertificação, secas, a degradação dos solos, a escassez de água doce e a perda de biodiversidade geram desafios ainda maiores para que estes objetivos sejam cumpridos (NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL, 2015).

Dentro do contexto de gestão dos recursos hídricos, as bacias hidrográficas, que de acordo com Porto e Porto (2008), são áreas territoriais de captação natural da água, através de precipitação, ou degelo em algumas regiões, que devido ao relevo converge ao escoamento para um rio principal que leva até a foz, foram estabelecidas como unidade de análise para as tomadas de decisões. Targa (2008) aponta que uma bacia hidrográfica é definida como uma área limitada há um sistema de drenagem composto de nascentes dos cursos de água, principais e secundários, denominados afluentes e subafluentes por divisores de água que levam para um único ponto denominado exutório.

Ross e Prette (1998) ressaltam que as bacias hidrográficas constituem um sistema natural que embora tenham como referência os corpos hídricos também incluem outros fatores naturais como relevo, solo, subsolo, flora, fauna, além de outros fatores como questões políticas e socioambientais que influenciam na disponibilidade e qualidade da água, e que têm sido utilizadas como referencial geográfico para adoção de práticas de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Teodoro et al. (2007) observam que de acordo com a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997 os princípios e normas para a gestão de recursos hídricos adotam a definição de bacias hidrográficas como unidade

de estudo e gestão o que torna de extrema relevância a compreensão do conceito de bacia hidrográfica e todos os fatores que englobam este sistema para gestores.

Rosa e Guarda (2019) ao discorrerem pela história da gestão dos recursos hídricos no Brasil apontam que a partir do período pós-colonial houve grande incentivo por parte do governo à industrialização, levando ao aumento populacional nos centros urbanos muitas vezes instalados em regiões com pouca oferta hídrica para abastecimento. Assume-se, portanto, que o aumento da demanda populacional em conjunto ao investimento no setor responsável pelo maior uso da água, a agricultura irrigada, e o foco do governo no crescimento econômico causaram grandes deficiências quanto ao abastecimento e saneamento básico.

Conforme apresentado por Bayer et al. (2021), a relação entre saneamento e saúde humana é uma preocupação histórica, que se intensificou com a Revolução Industrial, exigindo mudanças nos hábitos de higiene para controlar epidemias. No Brasil, a atuação de sanitaristas como Oswaldo Cruz e Saturnino de Brito na primeira metade do século XX foi fundamental para os avanços no saneamento, incluindo a limpeza urbana e a implementação de sistemas de água e esgoto em grandes cidades. No entanto, o país ainda enfrenta desafios significativos para ampliar o acesso ao saneamento básico, um fator crucial para o desenvolvimento sustentável e a prevenção de doenças, em conformidade com os objetivos da ONU. Políticas federais e municipais têm sido implementadas com o objetivo de universalizar esses serviços essenciais.

Almeida et al. (2020) descrevem que o crescimento urbano acelerado e desordenado no Brasil trouxe significativos desafios para o saneamento básico, resultando em problemas como a falta de abastecimento de água e esgotamento sanitário, especialmente em áreas urbanas vulneráveis. Essa situação aumenta os riscos de doenças transmitidas por veiculação hídrica e por vetores. Para mitigar esses problemas de saúde pública, é crucial a implementação de políticas integradas que envolvam a mobilização social, educação ambiental, melhorias habitacionais e, principalmente, o fortalecimento do saneamento básico.

De acordo com Silva et al. (2021), atualmente o Brasil apresenta uma problemática em relação a suprir a necessidade de toda a população de ter acesso à água de qualidade, pois apesar de deter cerca de 15% da água doce do planeta, é afetada por fatores como questões geográficas, crescimento populacional, aumento da poluição e ordem política, uso indevido dos recursos hídricos, além de uma deficiência na gestão presente na história do país.

Com relação à gestão dos recursos hídricos no Brasil, Azevedo et al. (2018) destacam que os recursos hídricos, embora abundantes, são limitados e requerem uma gestão

sustentável de modo a atender à demanda populacional e as atividades econômicas sem causar problemas de disponibilidade ou comprometendo a qualidade para gerações futuras.

Um dos maiores desafios enfrentados na quantificação ou qualificação da sustentabilidade está no levantamento de informações para avaliação de realidades locais, motivo pelo qual na gestão dos recursos hídricos e outros sistemas ambientais são pautados na utilização de parâmetros e variáveis para determinar o desempenho, denominados “indicadores”, fundamentais para representar de maneira simplificada uma situação e facilitar o processo de tomada de decisão por parte dos gestores (CARVALHO et al., 2011).

Segundo Machado et al. (2011), os indicadores são informações referenciadas no tempo e espacialmente localizadas que permitem o acompanhamento dinâmico da realidade partindo de sua integração. Já de acordo com o IBGE (2008), os indicadores são ferramentas compostas de variáveis correlacionadas a partir de diferentes configurações, e apresentam significados mais abrangentes acerca dos contextos aos quais são aplicados.

Outro aspecto a ser levado em consideração na gestão sustentável dos recursos hídricos é o ciclo natural na água. Conforme Fritzen e Binda (2011) o ciclo hidrológico envolve vários processos hidrológicos complexos que incluem as etapas pelas quais a água passa, como os três estados físicos (sólido, líquido e gasoso), os locais (superfície, subsuperfície, atmosfera e biosfera) e suas transições que são a evaporação, precipitação, interceptação, transpiração, infiltração, percolação, escoamento superficial, além do processo de escoamento subsuperficial.

O ciclo hidrológico também sofre influência da energia solar, gravidade e rotação terrestre para que sofra as transições de estado. Entretanto, a partir do momento em que sofre influência da ação do homem, conceito conhecido como antropia, como o desmatamento, impermeabilização do solo, deposição irregular de resíduos, entre outros, o ciclo da água é alterado e são gerados enormes impactos ambientais, afetando a disponibilidade da água de qualidade e comprometendo o balanço hídrico (FRITZEN e BINDA, 2011).

Segundo Fernandes et al. (2024), a antropização refere-se à ação humana recorrente que provoca mudanças significativas no meio ambiente, resultando em impactos tanto ambientais quanto socioculturais. Essas transformações, originadas pelas atividades humanas, afetam diretamente a gestão sustentável dos recursos hídricos, pois alteram os ecossistemas aquáticos e podem comprometer a disponibilidade e a qualidade da água. Para garantir a sustentabilidade hídrica, é essencial que as práticas de manejo considerem os efeitos da antropização, promovendo a adaptação e a preservação dos recursos naturais frente às mudanças induzidas pela ação humana.

De acordo com Peres e Silva (2013), conforme a necessidade de preservação de recursos hídricos e o conjunto de fatores que influenciam na disponibilidade de água, surge paralelamente a demanda por iniciativas que, auxiliem na garantia de água para suprir o consumo ao passo que considera a limitação natural do recurso, o que levou à elaboração da PNRH (BRASIL, 1997), que propôs seis instrumentos de gestão: os Planos de Bacias Hidrográficas, o enquadramento dos corpos de água, a outorga dos direitos de uso, a cobrança pelo uso de recursos hídricos, o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos e a compensação aos municípios.

O Plano de Bacias Hidrográficas (PBH), um dos instrumentos centrais de planejamento e gestão, conforme estabelecido pelo PNRH tem como objetivo geral estabelecer metas, ações, projetos, obras e investimentos de gerenciamento dos recursos hídricos com base nos diagnósticos de situação das bacias, visando garantir a disponibilidade de água à atual e às futuras gerações, em padrões de qualidade adequados para a utilização nas diversas atividades da sociedade (BRASIL, 1997).

Portanto, a gestão dos recursos hídricos, atualmente baseada no PBH, enfrenta desafios devido à ausência de indicadores claros, o que dificulta a avaliação do cumprimento das metas propostas, como descrito no Plano de Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2020 a 2035 (COMITÊS PCJ, 2020). Para monitorar a água ao longo de seu ciclo de vida e apoiar a tomada de decisões pelos gestores, é essencial o desenvolvimento de indicadores que traduzam as informações complexas dos recursos hídricos em diagnósticos precisos. Esses indicadores são fundamentais para fornecer evidências que permitam um controle eficaz dos fatores que afetam a água. A integração das Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) com Sistemas de Informação (SI) pode desempenhar um papel crucial nesse processo, aprimorando a capacidade de gestão e monitoramento sustentável dos recursos hídricos.

Turban et al. (2007) descreve que SI são sistemas baseados em computadores que permitem coletar, armazenar, recuperar e disseminar informações para fins específicos. Laudon e Laudon (2010) determinam que existem diversas classificações de SI, como Sistemas de Processamento de Transações (SPT), Sistemas de Informação Gerenciais (SIG), Sistema de Apoio Executivo (SAE) e Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) e que a aplicação de SI pode ser significativamente aprimorada com o uso de TIC.

Dentre as diferentes categorias de SI destaca-se o SAD, que conforme Quintella e Soares (2003) afirmam ser útil para apoiar no processo de tomada de decisões através do tratamento de dados ou informações pouco estruturadas coletadas tornando em conhecimento

ou informações úteis mais estruturadas que servem de subsídio incorporando ferramentas analíticas avançadas e tecnologias inovadoras para a coleta, armazenamento e análise de dados.

Kalehhouei et al. (2021) asseguram que o uso de TIC no contexto de gestão de bacias hidrográficas, auxiliam na tomada de decisão e favorecem operações de exploração tornando a gestão mais eficiente. Atualmente há uma variedade de tecnologias que podem ser aplicadas em um SAD, como é o caso da Internet das Coisas (IoT) para coleta de dados, Big Data para análise, Inteligência Artificial para previsões, Blockchain que fornece mais segurança de informações, Realidade Aumentada e Realidade Virtual entre outras, e que a seleção de opções para se utilizar depende da avaliação conforme disponibilidade, custos, viabilidade de operação e os objetivos das partes interessadas da bacia hidrográfica, como moradores, agricultores, especialistas, planejadores de uso da terra e gestores, bem como os tomadores de decisão e formuladores de políticas públicas.

Desse modo, considerando a complexidade inerente à gestão dos recursos hídricos, surge a necessidade premente de contar com informações que possam ser traduzidas em indicadores úteis capazes de orientar ações e medidas direcionadas à preservação e uso sustentável da água. Nesse contexto, os PBH desempenham um papel crucial ao estabelecerem diretrizes e metas para a gestão integrada dos recursos hídricos, contudo, a eficácia desses planos está intrinsecamente ligada à capacidade de monitorar seu desempenho e efetividade ao longo do tempo, trazendo a importância do uso de SAD, os quais fornecem ferramentas analíticas e computacionais que facilitam a interpretação de dados complexos e auxiliam na tomada de decisões. Surge então o seguinte questionamento: Como monitorar as ações de um plano de bacias hidrográficas a partir de indicadores e com o auxílio de TIC?

1.2. Objetivos do trabalho

Assim, o objetivo desse projeto de pesquisa é explorar possibilidades de um SAD para a gestão sustentável de recursos hídricos aplicado aos planos de bacias hidrográfica que se baseia em indicadores, cuja coleta de dados, cálculo e análise é auxiliado por TIC inovadoras propondo um modelo teórico que poderia ser desenvolvido em pesquisas futuras.

Diante do objetivo a ser alcançado, a seguir são descritos os seguintes objetivos específicos. São eles:

- Descrever conceitos e definições de bacias hidrográficas, gestão dos recursos hídricos e principais características de indicadores;
- Identificar e descrever principais características de Sistemas de Apoio à Decisão (SAD), TIC inovadoras que podem ser utilizadas no contexto das bacias hidrográficas e da gestão de recursos hídricos;
- Descrever conceitos e principais características de um Plano de Bacias Hidrográficas com enfoque no Plano de Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PBH PCJ)
- Apresentar uma proposta de SAD que permita monitorar as ações dos planos de bacias a partir de cálculo e análise de indicadores com o suporte das TIC;
- Demonstrar como o SAD poderia ser aplicado ao PBH PCJ.

1.3. Justificativa

Ao observar a lacuna existente na exploração acadêmica com relação à aplicação de um SAD com o auxílio de TIC para o monitoramento e avaliação das bacias hidrográficas e da efetividade do PBH, que estabelece metas e ações a serem cumpridas, e considerando que a água é um recurso natural escasso e finito, mas necessário para a sobrevivência de todos os seres vivos e para as atividades econômicas da sociedade, torna-se imprescindível que se proponham formas de garantir a segurança hídrica e uma gestão de recursos hídricos eficiente.

Nesse contexto, o trabalho mostrará de que forma um SAD associado às TIC pode auxiliar no processo de tomada de decisões, fornecendo subsídios por meio da captação, análise e cálculo de indicadores, tornando-os úteis e comparativos às ações planejadas, a fim de avaliar a efetividade ou necessidade de modificação do PBH.

Além disso, a implementação de um SAD associado a TICs inovadoras para a coleta, análise e cálculo de indicadores relevantes no contexto de um PBH está intrinsecamente alinhada às diretrizes do ODS 6 da proposta pela ONU. Dado que os PBHs têm como premissa a gestão sustentável dos recursos hídricos, a avaliação contínua de sua implementação e efetividade torna-se essencial para assegurar que suas metas estejam sendo cumpridas. Nesse sentido, o monitoramento sistemático dos avanços e desafios enfrentados na execução dessas políticas não apenas contribui para o aprimoramento das estratégias de

gestão hídrica, mas também fortalece os esforços globais voltados ao cumprimento do ODS 6, cuja concretização ainda enfrenta desafios significativos.

Adicionalmente, a relevância deste estudo também se justifica pela dificuldade em levantar informações sobre a situação hídrica, uma vez que muitos dos dados necessários dependem de diferentes órgãos, municípios e estados, o que compromete a geração de relatórios finais e dificulta a avaliação precisa do cenário hídrico. Dessa forma, a implementação de um SAD pode representar uma alternativa viável para a superação desses desafios, promovendo maior transparência, integração de informações e eficiência na gestão dos recursos hídricos.

1.4. Estrutura do trabalho

No capítulo 1, foi descrita a contextualização do problema, introdução de conceitos abordados na dissertação, apresentado os objetivos do trabalho, a justificativa e a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 trata-se da Fundamentação Teórica, no qual discorreu-se sobre os temas Bacias Hidrográficas, Gestão dos recursos hídricos, Indicadores, Tecnologias da Informação e Comunicação e Plano de Bacias Hidrográficas, onde foram apresentados conceitos, definições e principais características.

No capítulo 3 foi descrita a metodologia de pesquisa e o método utilizado para chegar na proposta de um SAD que seja capaz de monitorar as metas e ações dos Planos de Bacias Hidrográficas.

No capítulo 4 foi apresentada a contribuição científica, ou seja, o SAD que permita, com o auxílio de Tecnologias inovadoras, coletar e analisar os indicadores e as ações do Plano de Bacias Hidrográficas, aplicando a proposta ao PBH PCJ

No capítulo 5 foram apresentadas as principais conclusões e sugestões para novos trabalhos.

Por fim, no capítulo 6 foram apresentadas as referências bibliográficas.

2. Fundamentação teórica

2.1. Bacias hidrográficas e gestão de recursos hídricos

2.1.1. Conceitos e definições bacias hidrográficas

Teodoro et al. (2007) e Barella et al. (2000) oferecem definições complementares das bacias hidrográficas, descrevendo-as como áreas geográficas delimitadas por divisores de água, onde as precipitações pluviais se acumulam, dando origem a cursos de água como riachos e rios, ou infiltram no solo para formar o lençol freático. Essas formações, localizadas nas regiões mais elevadas da topografia, são caracterizadas por um sistema fluvial composto por um rio principal e seus afluentes. À medida que as águas superficiais fluem para as áreas mais baixas do relevo, os rios e riachos se unem, aumentando seu volume e contribuindo para a formação de rios de maior porte que eventualmente deságuam nos oceanos.

Também é abordado por Teodoro et al. (2007) o termo microbacias, dentro do contexto de bacias hidrográficas. De acordo com os autores, a distinção entre bacias hidrográficas e microbacias é encontrada na escala de análise e nos fatores que influenciam a geração do deflúvio. Enquanto as bacias hidrográficas são áreas maiores de drenagem delimitadas por divisores de água, as microbacias são porções menores dentro dessas bacias, caracterizadas por uma sensibilidade aumentada às chuvas de alta intensidade e ao uso do solo. Essa sensibilidade resulta em alterações mais perceptíveis na quantidade e qualidade da água do deflúvio em resposta a eventos climáticos intensos ou mudanças no uso do solo. Esta distinção é importante e deve ser considerada para uma gestão dos recursos hídricos eficaz.

De acordo com Costa et al. (2007), as bacias, sub-bacias e microbacias hidrográficas são consideradas unidades cruciais para a gestão e o planejamento ambiental, tanto em ambientes rurais quanto urbanos. Isso se deve à capacidade de realizar monitoramento hidrológico, planejar a conservação do solo e regular o uso da terra, considerando sua interligação com o ciclo hidrológico. Essas unidades são essenciais na produção de água em termos de qualidade e quantidade, pois representam uma compartimentação ambiental que desempenha um papel fundamental no controle da captação, armazenamento e drenagem da água, interagindo com fatores como relevo, solo, cobertura do solo e clima.

Do ponto de vista conceitual, a bacia hidrográfica desempenha um papel central como unidade de gestão da paisagem, especialmente no contexto do planejamento ambiental e da administração dos recursos hídricos. Pires et al. (2005) destacam que o entendimento dessa concepção tem evoluído para compreender a bacia hidrográfica como um sistema biofísico complexo, que abrange sistemas hidrológicos e ecológicos interligados. A água atua como

elemento central de convergência em um sistema ambiental que engloba múltiplas relações entre os diversos componentes, sejam eles físicos, bióticos ou de origem humana.

De acordo com Magalhães e Barp (2014), a gestão integrada de bacias hidrográficas, com foco especial na gestão da água, fundamenta-se principalmente na habilidade das organizações públicas e privadas em tomar decisões e elaborar estratégias para atingir objetivos predefinidos por e para um conjunto significativo de atores que dependem e compartilham um mesmo recurso e território. As decisões desse grupo de gestão, expressas por meio de estratégias de ação, são formalizadas na forma de planos, como é o caso dos Planos de Bacias Hidrográficas que serão posteriormente abordados neste trabalho.

2.1.2. Conceitos e definições de Gestão de recursos hídricos

De acordo com Pereira et al. (2020), devido à crescente escassez de água, torna-se essencial um acompanhamento metódico da demanda por recursos hídricos em diferentes setores da sociedade, considerando tanto a quantidade de água efetivamente disponível quanto o controle rigoroso sobre a qualidade das águas devolvidas aos cursos d'água naturais. A contaminação das águas, independentemente do grau de poluição, pode restringir ou inviabilizar determinados usos, além de aumentar o risco de proliferação de doenças. A falta de planejamento adequado para o uso dos recursos naturais, especialmente dos recursos hídricos, muitas vezes devido à falsa percepção de abundância, leva à adoção de práticas inadequadas, gerando um ciclo de consequências negativas. Isso resulta em perdas econômicas, sociais e ambientais, comprometendo o desenvolvimento e o bem-estar social.

A questão essencial na gestão dos recursos hídricos não se encontra associada à disponibilidade nem à capacidade tecnológica de processamento, mas sim à complexidade, eficácia e aplicabilidade dos mecanismos de gestão e governança dos recursos hídricos, como discutido por Chaffin et al. (2016). Estes mecanismos devem abarcar, além dos elementos climáticos e ambientais, todo o ciclo de vida da água, abrangendo a sua geração por meio dos processos naturais dos ciclos hidrológicos, a retenção e armazenamento, a captação e tratamento, bem como a distribuição e consumo, englobando diversos intervenientes, incluindo os ecossistemas em geral.

Considerando que a gestão dos recursos hídricos utiliza como unidade de medida a extensão territorial das bacias hidrográficas, é essencial que se compreenda os processos do ciclo hidrológico que acontecem neste espaço para que se analise a disponibilidade e qualidade da água. De acordo com Christofidis et al. (2020), para uma gestão eficaz das

águas, é crucial compreender o ciclo hidrológico em suas diversas etapas. Esse ciclo começa com a evaporação das águas oceânicas, cujo vapor é transportado pelas massas de ar e condensa-se para formar nuvens, resultando em precipitação. Profissionais da gestão hídrica dividem essa precipitação em duas categorias: a "água azul," que inclui o escoamento superficial e subsuperficial, alimentando os cursos d'água e recarregando aquíferos; e a "água verde," que compreende a água retida na vegetação e nas camadas superiores do solo, servindo como fonte primária para diversos ecossistemas. A água precipitada é distribuída de diferentes formas: parte dela é retida temporariamente no solo, retornando à atmosfera por evaporação ou transpiração das plantas, enquanto outra fração escoam superficialmente, alimentando rios, ou infiltra-se no solo, recarregando o lençol freático. Esse processo é essencial para manter o equilíbrio dos ecossistemas e garantir a renovação dos recursos hídricos disponíveis para uso humano.

De acordo com dados do Censo Demográfico encontrado na Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023, a retirada total de água estimada dos usos setoriais no Brasil foi de 2.035,2 m³/s ou 64,18 trilhões de litros no ano distribuídos de modo bastante desigual no território nacional, onde os principais usos de água no Brasil, que utilizaram cerca de 84% do volume de água retirada, foram nos setores de irrigação (50,5%), abastecimento urbano (23,9%) e a indústria (9,4%), conforme relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2023, publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA).

Carter et al. (2005) afirmam, então, que a gestão integrada dos recursos hídricos é necessária, uma vez que as atividades e políticas devem considerar os fatores essenciais, sendo eles o crescente desenvolvimento econômico e a disponibilidade das águas superficiais e subterrâneas. Neste sentido, é necessária a integração entre as atividades setoriais que impactam os recursos hídricos, como a agricultura, a coordenação das instituições governamentais e não governamentais que são responsáveis ou atuam na gestão territorial e dos recursos hídricos e a participação social nas tomadas de decisão de modo a tornar a gestão mais eficiente.

Ademais, Carter et al. (2005) apontam que uma gestão integrada dos recursos hídricos estabelece um novo modelo a medida em que considera a inter-relação entre os recursos hídricos (superficiais e subterrâneos) e as inúmeras finalidades da água dentro das atividades da sociedade, assim como as necessidades de manter padrões de qualidade hídrica para o funcionamento dos ecossistemas aquáticos. Apenas desta forma é possível se fazer uma gestão sustentável das águas, considerando sua disponibilidade para as gerações futuras, por meio de sistemas de planejamento integrado.

Magalhães e Barp (2014) enfatizam a importância de uma abordagem integrada na gestão da água, que vai além dos princípios tradicionais de gestão. Essa abordagem reconhece que a gestão da água deve ser vista como um processo que visa a coordenação e o gerenciamento eficaz dos recursos hídricos. Seu objetivo é maximizar os benefícios econômicos e sociais sem comprometer a vital sustentabilidade dos ecossistemas. Essa abordagem integrada aborda diversas dimensões, terra e água, bacias hidrográficas e ambientes costeiros, águas superficiais e subterrâneas, quantidade e qualidade da água, e considera aspectos como desenvolvimento econômico, social, humano e institucional, além de compreender os efeitos econômicos da cadeia produtiva da água, incorporando disciplinas como engenharia, economia, meio ambiente, aspectos sociais e eficiência.

Considerando o contexto do Brasil, devido à vastidão territorial e diversidade existente, emergem contextos diversos no que tange à disponibilidade regional de recursos hídricos. Um exame preliminar evidencia múltiplas ocorrências de carência hídrica, por consequência da contaminação oriunda de fontes domésticas, industriais e agrícolas. (VALENCIO et al., 2001). Tal como ocorre em numerosos países em fase de desenvolvimento e com condições econômicas menos favoráveis, o Brasil evidencia uma taxa diminuta de cobertura dos serviços essenciais de saneamento básico, juntamente com níveis significativos de perdas físicas no fornecimento de água tratada ou própria para consumo. Uma proporção considerável da população brasileira permanece desatendida pelos sistemas de fornecimento devido a disposição de esgoto não tratado em cursos d'água, corpos de água e até mesmo no oceano.

De acordo com Porto e Porto (2008), a gestão de recursos hídricos com base nas bacias hidrográficas teve destaque no início dos anos 1990 com a definição do acordo de Princípios de Dublin, no qual é descrito como primeiro princípio de que para uma gestão dos recursos hídricos efetiva, deve considerar todos os aspectos, físicos, sociais e econômicos, sugerindo que o que torna essa integração focada seria gestão esteja baseada nas bacias hidrográficas

No cenário brasileiro foi estabelecido em 1976 o acordo entre o Ministério das Minas e Energia e o governo do Estado de São Paulo para que houvesse esforços para o avanço das condições sanitárias das bacias do Alto Tietê e Cubatão no Brasil, preocupação movida pelo reconhecimento de problemas relacionados ao uso da água. A partir deste acordo foi elaborado o Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas (CEEIBH) e em sequência impulsionou a criação de comitês executivos em diversas bacias hidrográficas que desempenharam um papel inicial de consultoria, não havia a obrigatoriedade de

implantação das decisões estabelecidas, e participavam apenas órgãos do governo (PORTO e PORTO, 2008).

No ano de 1989 houve uma iniciativa a partir de diversas cidades situadas nas áreas geográficas correspondentes às Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba e Capivari que levou à fundação do Consórcio Intermunicipal das Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari que teve como propósito primordial de fomentar a restauração ecológica das referidas vias fluviais, além de integração regional e a orquestração do planejamento inerente ao desenvolvimento da mencionada bacia hidrográfica. Tal iniciativa é considerada inovadora por partir do âmbito da gestão pública local, e se destaca, especialmente, pelo delineamento de um plenário composto por distintas entidades, que visa a convocação ativa da sociedade civil para engajar-se no processo de deliberação e tomada de decisões estratégicas. (CASTELLANO, 2007)

Luchini (2000) aponta que, por conseguinte, no ano de 1997, com a aprovação da Lei n. 9.433, o sistema de gestão dos recursos hídricos por bacias hidrográficas concretizou-se. Atualmente no Brasil a gestão dos recursos hídricos permanece estruturada por bacias hidrográficas como unidade de planejamento, associada ao reconhecimento da água como bem econômico, o reconhecimento da importância de seus usos múltiplos e a necessidade de um trabalho de gestão a um só tempo descentralizado e participativo em todo o território nacional. Entretanto há desafios inerentes a esse recorte geográfico, uma vez que a gestão eficaz dos recursos hídricos demanda a coparticipação entre as esferas da administração pública, órgãos de saneamento, organizações ligadas à agricultura, gestão ambiental, bem como outros atores relevantes, nos quais cada um destes setores está associado a uma divisão administrativa nitidamente distinta em relação à demarcação da bacia hidrográfica.

Na década de 1980, conflitos entre diversos usuários da água devido à construção de hidrelétricas, poluição hídrica por falta de tratamento de esgotos e aumento das demandas por irrigação geraram pressões sociais por uma gestão independente do recurso. O Poder Executivo propôs então a criação de um Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos, que resultou na elaboração da PNRH, promulgada em 1997. A Constituição Federal de 1988 já havia definido a água como bem de uso comum e estabelecido sua propriedade. A PNRH descentraliza a gestão para bacias hidrográficas e compartilha responsabilidades entre União, Estados e Municípios. O sistema inclui instrumentos como PNRH, classificação da qualidade da água, outorga e cobrança pelo uso, além de participação pública. (BRASIL, 1997)

Pizella (2015) destaca que a medida que o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH) foi sendo adotado, a atuação dos municípios no processo de gestão através da participação nos Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH) é essencial, pois cabem a eles as decisões quanto ao ordenamento territorial, exigências à proteção e fiscalização do uso de seus recursos naturais e a regulação de suas atividades econômicas. Dentre as questões locais que impactam os recursos hídricos sob responsabilidade da gestão municipal se encontram a coleta e adequada disposição final dos resíduos sólidos, a proteção dos mananciais e a drenagem urbana. Também é obrigação das prefeituras municipais, do estado ou de concessionárias a garantia do abastecimento de água e coleta e tratamento de esgotos domiciliares, mas para que essa gestão seja eficiente é necessário que se utilizem indicadores.

Porto e Porto (2008) destacam a importância da integração de todos os aspectos relacionados ao uso da água e à preservação ambiental como fundamentais para as ações direcionadas à gestão dos recursos hídricos. Os autores também observam a variedade de instrumentos de gestão disponíveis, incluindo aqueles associados ao controle, como a outorga, ao estímulo, como a cobrança, e ao apoio, como os Sistemas de Informação (SI). Esses sistemas desempenham um papel crucial na gestão eficaz dos recursos hídricos, pois possibilitam que o processo de gestão seja mais assertivo por meio da utilização de informações fornecidas pelos SI e expressas por meio de indicadores.

2.2. Indicadores

De acordo com o Ministério do Planejamento (2012), um indicador é uma medida, seja ela quantitativa ou qualitativa, que possui um significado específico e é empregada para organizar e capturar informações relevantes dos elementos que compõem o objeto da observação. Em essência, os indicadores são dados que possibilitam descrever, classificar, ordenar, comparar ou quantificar de maneira sistemática aspectos de uma realidade, atendendo às necessidades dos tomadores de decisões, ou seja, um conjunto de informações coletadas acerca de uma realidade específica, compreendendo índices, variáveis e valores de referência padronizados que permitem a mensuração de situações para análise e avaliação.

Nesse contexto, conforme explicado por Dias (2018), os indicadores representam ferramentas destinadas à obtenção de informações, tendo como objetivo principal sintetizá-las

de maneira simples, lógica e clara. Essa abordagem visa proporcionar informações de forma informativa, facilitando a compreensão por parte dos gestores.

Pinheiro (2022) esclarece que os indicadores constituem uma metodologia para classificar fenômenos, empregando uma variedade de aspectos da sociedade que são quantificados e transformados em informações mensuráveis. A utilização das categorias como "indicadores econômicos", "indicadores sociais", "indicadores ambientais" e "indicadores de saneamento", em diversos setores, abrangendo contextos acadêmicos, políticos e midiáticos, evidencia a relevância e amplitude de sua aplicação. Dessa maneira, compreende-se que os indicadores desempenham um papel informativo crucial, proporcionando uma representação abrangente de vários aspectos da sociedade.

De acordo com Mizutani e Conti (2021), a utilização de indicadores desempenha o papel de transformar dados brutos em informações mensuráveis, tornando-os acessíveis e passíveis de aplicação. A abordagem de mensuração proporciona uma representação concreta do conceito, facilitando a formulação de políticas e a avaliação de desempenho para os gestores.

Chaves et al. (2020) identificam três categorias distintas de indicadores. Os indicadores descritivos, que se baseiam em dados diretos sem uma especificação prévia de uso; os indicadores de desempenho, cuja finalidade principal é evidenciar o progresso em direção a uma meta específica; e os indicadores compostos, que fornecem informações mais abrangentes e detalhadas para a avaliação de desempenho, visando a transmitir informações de forma mais abrangente, atendendo a diversos públicos.

Singh et al. (2012) aponta que uma abordagem para mensurar quantitativamente a sustentabilidade reside na utilização de índices e indicadores. Os indicadores de sustentabilidade são instrumentos empregados para facilitar a supervisão da implementação do desenvolvimento sustentável. A elaboração de um indicador é concebida com o propósito de compreender uma realidade específica, demandando a capacidade de sintetizar um conjunto intrincado de informações e elucidar o significado fundamental dos aspectos analisados.

Dias (2018) acrescenta que, no âmbito da gestão dos recursos hídricos, os indicadores empregados são criteriosamente selecionados para englobar todas as condições relevantes no processo de abastecimento, consumo e tratamento da água.

A gestão sustentável dos recursos hídricos requer a utilização de indicadores quantitativos e qualitativos que possibilitem a avaliação contínua das condições ambientais e socioeconômicas das bacias hidrográficas. Os indicadores de sustentabilidade hídrica,

conforme Lacerda e Cândido (2013), são ferramentas essenciais para refletir e comunicar aspectos complexos relacionados à disponibilidade e qualidade da água, permitindo a análise do estado atual dos recursos hídricos e a projeção de cenários futuros. Além disso, esses indicadores viabilizam a identificação de áreas críticas, a formulação de políticas públicas eficientes e o planejamento estratégico para mitigar impactos ambientais e garantir a segurança hídrica para as gerações futuras.

Nesse contexto, Carvalho et al. (2013) apontam que os indicadores de sustentabilidade hidroambientais assumem um papel fundamental no monitoramento da operacionalização do desenvolvimento sustentável dos recursos hídricos. Eles possibilitam a mensuração das condições ambientais, econômicas, institucionais e sociais que influenciam diretamente a gestão da água, oferecendo suporte para a tomada de decisões informadas e baseadas em dados concretos. A implementação desses indicadores permite não apenas a avaliação da qualidade e quantidade dos recursos hídricos, mas também a previsão de riscos de escassez e a identificação de impactos antrópicos, fortalecendo a governança hídrica e promovendo um uso mais eficiente e sustentável da água.

Magalhães Júnior (2010) propõe um conjunto de indicadores ambientais que podem contribuir significativamente para a gestão dos recursos hídricos no Brasil. Esses indicadores abrangem diferentes dimensões, incluindo sete voltados à cobertura vegetal, quatro relacionados à qualidade dos estoques hídricos e quatorze que analisam a dinâmica fluvial e os riscos de não atendimento às demandas. Além disso, são destacados vinte e um indicadores para avaliar a qualidade da água, treze que mensuram pressões ou impactos sobre os corpos hídricos e ambientes aquáticos e quinze que analisam a disponibilidade hídrica, especialmente no que tange à redução dos estoques. Também são mencionados cinco indicadores voltados às pressões sobre a qualidade da água, decorrentes de atividades agrícolas e industriais, vinte e cinco que avaliam as respostas e o desempenho do sistema de gestão hídrica e onze que analisam aspectos legais, institucionais, financeiros e de fiscalização.

Lira e Cândido (2013) afirmam que a aplicabilidade desses modelos de indicadores está diretamente relacionada à necessidade de monitoramento contínuo e à avaliação da eficácia das políticas de gestão hídrica. Ao integrar os indicadores de sustentabilidade em um planejamento estratégico abrangente, é possível desenvolver políticas públicas mais eficazes, promover a conservação dos recursos hídricos e minimizar os efeitos negativos das atividades humanas sobre o meio ambiente.

Há diversos índices utilizados na gestão dos recursos hídricos que para serem avaliados dependem de um conjunto de indicadores. Os índices de qualidade da água são

ferramentas essenciais para o monitoramento e a gestão dos recursos hídricos, compostos por um conjunto de indicadores úteis, sendo amplamente utilizados para avaliar a adequação da água para diferentes usos, como abastecimento público, preservação da vida aquática e atividades recreativas. O Índice de Qualidade das Águas (IQA) é um dos principais indicadores empregados no Brasil, tendo sido desenvolvido pela National Sanitation Foundation (NSF) e posteriormente adaptado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Esse índice considera nove indicadores fundamentais, incluindo oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, pH, temperatura da água, nitrogênio total, fósforo total, turbidez e resíduo total. Com valores que variam de 0 a 100 (CETESB, 2023).

Além do IQA, outros índices são empregados na análise da qualidade da água, como o Índice de Qualidade de Água de Smith (IS) que também adota uma escala de 0 a 100, diferenciando-se por atribuir pesos distintos a cada parâmetro ambiental, o que permite uma avaliação mais flexível e ajustada às características dos diferentes corpos d'água (SMITH et al., 1970).

Outros índices complementam a análise da qualidade da água, como o Índice de Qualidade de Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público (IAP), que avalia a água antes do tratamento, o Índice de Preservação da Vida Aquática (IVA), que considera a capacidade do ecossistema aquático de se manter equilibrado, e o Índice de Balneabilidade (IB), empregado para determinar a adequação da água para atividades recreativas, com base na presença de coliformes fecais e *Escherichia coli* (IBAMA, 2021). O uso desses índices em conjunto possibilita uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos, contribuindo para a manutenção da qualidade ambiental e para a proteção da saúde humana.

Bega et al. (2021) afirmam que o uso dos indicadores é essencial para medir a evolução da sustentabilidade quanto aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) 6 no Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PRH PCJ) 2020-35 e verificar a progressão do impacto na disponibilidade dos recursos hídricos, promovendo opções e ações mais propensas a preservar ou ampliar as oportunidades para garantir água para as futuras gerações através de novas medidas. Para que os indicadores sejam monitorados é viável contar com o apoio de SI associados às TIC, que possuem a capacidade de captar, armazenar e analisar dados através de cálculos e fórmulas. Essa capacidade técnica das TIC não apenas facilita a avaliação dos indicadores, mas também permite uma análise mais abrangente e dinâmica, contribuindo assim para a formulação de políticas e práticas de gestão hídrica mais informadas e eficazes.

2.3. Tecnologias da informação e comunicação

2.3.1. Sistemas de informação e de apoio à decisão

Segundo Zimath (2007), os sistemas de informação podem ser classificados em sistemas de apoio às operações e sistemas de apoio gerencial.

O Sistema de Processamento de Transações (SPT) lida com as transações operacionais diárias de uma empresa, enquanto o Sistema de Informação Gerencial (SIG) processa os dados dessas transações para gerar relatórios que oferecem uma visão ampla das operações, auxiliando os gerentes na tomada de decisões táticas. O Sistema de Informação para Executivos (SIE) é projetado para fornecer informações diretamente aos executivos, com ênfase na facilidade de uso, visão global da organização e recursos gráficos avançados, sem a necessidade de intermediários. Por fim, o Sistema de Apoio à Decisão (SAD) é destinado a decisões semi estruturadas e não estruturadas, apresentando como principal característica ser customizado ao estilo cognitivo dos tomadores de decisão, oferecendo suporte em situações que requerem tanto procedimentos padrões quanto julgamento subjetivo.

Galioto et al. (2020) acrescentam que as tecnologias contribuem ao auxiliar na percepção de eventos incertos ou despercebidos pelos tomadores de decisão e, como resultado, a capacidade do tomador de decisão de gerenciar eventos inesperados, e permite que o usuário desenvolva estratégias para evitar a possibilidade de eventos adversos ou mitigar danos, uma vez que utilizar como base mais informações reduzem a incerteza e facilitam o processo de tomada de decisão.

Chaves et al. (2020) destacam a importância crítica das decisões para indivíduos e organizações, ressaltando suas potenciais consequências irreversíveis, mas o suporte oferecido pelos SAD, em conjunto com tecnologias, pode auxiliar significativamente nesse processo, por permitirem que o gestor conheça e monitore os aspectos do contexto que afetam seus valores identificando problemas, construir escalas de medição inteligíveis para esses aspectos, identificar como cada um contribui para a avaliação global e realizar diagnósticos locais e globais usando dados da situação atual. O monitoramento possibilita ao decisor visualizar a situação atual, simular diferentes cenários e fazer escolhas fundamentadas para melhorar o desempenho do contexto.

Conforme Júnior (2006) determina, os primeiros SAD surgiram na década de 1960, em decorrência da crescente competitividade entre as empresas e a disponibilidade de tecnologias de hardware e software para armazenar e consultar as informações de forma ágil. Exibe diversas características, incluindo a habilidade de processar grandes volumes de dados,

adquirir dados externos à organização e integrá-los aos internos de múltiplas fontes, flexibilidade na geração de relatórios gerenciais, execução de rotinas de otimização, aptidão para encontrar a melhor solução em problemas simples e buscar alternativas relevantes em problemas complexos, além de realizar análises de simulação e fornecer suporte em diversos níveis do processo de tomada de decisão.

McIntosh et al. (2011) pontuam que o foco dos SAD e Sistemas de Apoio à Decisão para a Gestão Ambiental (SADGA) concentra-se na compreensão de como desenvolver sistemas mais úteis e utilizáveis para tarefas de tomada de decisão em organizações voltadas para a política ambiental e a gestão. Por vezes, tais tarefas podem demandar uma abordagem de modelagem participativa como é o caso de formulação de políticas, SAD e SADGA tem como objetivo desenvolver sistemas capazes de suportar uma ampla gama de processos de tomada de decisão estratégica e operacional (como planejamento) em organizações.

Uma descrição dada a um SAD é de um sistema que combina modelos e dados, projetado para auxiliar na tomada de decisões em problemas pouco ou não estruturados. Os SAD se baseiam em conhecimento para dar suporte às decisões em uma organização, permitindo a análise de grandes volumes de dados transacionais, estudos multidimensionais dos dados e aplicação de modelos de decisão adequados. Dessa forma, um SAD poderia ser útil para embasar as tomadas de decisão estratégicas em diversas áreas, como na gestão dos recursos hídricos. (NOGUEIRA, 2014).

De acordo com Barbosa e Almeida (2002), a arquitetura básica de um SAD é composta por três elementos: dados, modelos e usuário. Na tecnologia da informação (TI), esses elementos correspondem a um Banco de Dados, responsável pelo armazenamento de dados internos ou externos, acompanhado de um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD) para acessar e manter esses dados; um Banco de Modelos, contendo modelos matemáticos que calculam fórmulas e estatísticos que, combinados com os dados do Banco de Dados, permitem realizar várias análises; e um Gerenciador de Diálogos, que oferece interfaces interativas e amigáveis entre o usuário e o sistema.

Prasad e Ratna (2018) assumem um SAD como um sistema computadorizado que auxilia os tomadores de decisão a usarem modelos e dados para resolver problemas identificados, no qual sua função é automatizar tarefas operacionais e facilitar a tomada de decisões. Os SAD fornecem fontes de conhecimento, atualizáveis para incorporar novas tecnologias emergentes, e visam superar as deficiências no processo de julgamento humano e no processo decisório. Eles são implementados como programas de computador, com origem

em disciplinas como estatística, economia e pesquisa operacional, enriquecidos por técnicas de ciência da informação, psicologia cognitiva e inteligência artificial, e auxiliam interativamente os usuários em atividades de julgamento e escolha, conhecidos como sistemas baseados em conhecimento devido à formalização do conhecimento de domínio para raciocínio mecanizado.

Ademais, Bortolin Jr. (2011) afirma que um SAD pode apresentar diversas características, tais como: a inclusão de uma fase de obtenção de dados destinada à análise, provenientes de diversas fontes; a habilidade de buscar dados de fontes externas; a capacidade para manipular um grande volume de dados e informações; a incorporação de um sistema de gerenciamento de banco de dados que suporte análises com elevado volume de dados; a capacidade de facilitar a elaboração de relatórios gerenciais; e a aptidão para disponibilizar resultados em formatos diversos. Porto e Azevedo (1997) apontam que os SAD têm sido aplicados em diversos setores da sociedade que demandam auxílio no processo de decisão, como é o caso do gerenciamento e planejamento de sistemas de recursos hídricos.

Para Patzlaff et al. (2010) os SAD são ferramentas interativas baseadas em software que auxiliam no processo de tomada de decisões ao apresentar múltiplos atributos, objetivos ou metas. De acordo com Patzlaff et al. (2010), é possível dividir os SAD em dois tipos: os Sistemas Especialistas e os Sistemas Baseados em Conhecimento Aberto que utilizam Raciocínio Baseado em Casos.

Um Sistema Especialista é estabelecido a partir de uma base de conhecimento que contém informações gerais, regras e procedimentos aplicáveis ao problema que o sistema pretende resolver e um mecanismo de inferência que é alimentado por regras fornecidas por especialistas, realizando raciocínio baseado em modelos. (POWER, 2002).

Estes Sistemas Especialistas são constituídos de um mecanismo multicritério de avaliação baseado em uma árvore de decisão com o objetivo de ajudar o profissional a gerenciar diferentes etapas do processo complexo de projeto. No entanto, os Sistemas Especialistas enfrentam duas limitações: a criação do sistema requer um esforço significativo para obter o conhecimento necessário, que deve ser bem definido e há desafios na manutenção ou atualização contínua do sistema. (WATSON, 1997).

Um sistema aberto, como é o caso Sistemas Baseados em Conhecimento Aberto tem como base o conhecimento dinâmico, apresenta vantagens sobre os Sistemas Especialistas, destacando-se em áreas nas quais o conhecimento ainda está em desenvolvimento, como é o caso das bacias hidrográficas inteligentes, um assunto que está sendo explorado e em crescimento. (FAYYAD et al., 1996).

Uma técnica utilizada nos SAD do tipo Sistemas Baseados em Conhecimento Aberto é o Raciocínio Baseado em Casos (RBC). Essa abordagem utiliza conhecimento e experiências prévias (casos) para resolver problemas específicos. Ao contrário de outras técnicas, o RBC se concentra em experiências reais contidas em uma base de dados, permitindo a reutilização de soluções para problemas semelhantes. Suas vantagens incluem não depender de um modelo explícito, ser flexível com grandes volumes de dados e a capacidade de aprender com novos casos, facilitando a atualização contínua do sistema. (WATSON, 1997).

Kolodner (1993) complementa ao afirmar que o sistema de RBC, que exige como elementos básicos a Representação do conhecimento, Medida de similaridade, Adaptação e Aprendizado, como é descrito no Quadro 1:

Quadro 1 - Elementos básicos de SAD com técnica de RBC

Representação do conhecimento	O conhecimento frequentemente é transmitido por meio de casos que descrevem experiências específicas. No entanto, em certas circunstâncias, um sistema de RBC pode acomodar diferentes formas de conhecimento relacionadas ao campo de aplicação, como casos abstratos, generalizados, tipos de dados e modelos de objetos utilizados como informação.
Medida de similaridade	A similaridade entre casos ocorre quando as características que genuinamente representam o conteúdo e o contexto são comparáveis, seguindo um padrão. No desenvolvimento de um SAD com a técnica de RBC, a avaliação da similaridade do caso a ser resolvido ocorre por meio da comparação com casos, onde a semelhança entre os casos é determinada pela afinidade das características que verdadeiramente representam o conteúdo e o contexto da experiência.
Adaptação	Uma vez que problemas preexistentes raramente se assemelham exatamente aos problemas atuais, as soluções previamente utilizadas frequentemente são modificadas e adaptadas para abordar novas questões. O processo de adaptação tem por objetivo a alteração de um caso, quando necessário, a fim de resolver a problemática apresentada.
Aprendizado	No contexto de um sistema de RBC, a aprendizagem ocorre primariamente por meio da acumulação de novas experiências na memória

	de casos, bem como na correta indexação dos problemas. Este processo envolve a incorporação dos elementos úteis provenientes de problemas resolvidos, após submeter-se a uma avaliação e realizar ajustes quando necessário.
--	--

Fonte: Adaptado de Kolodner (1993).

É notável que os SAD têm ganhado popularidade em várias áreas, incluindo negócios, engenharia, militar e medicina, sendo especialmente úteis em situações com grande quantidade de informações disponíveis, nas quais a intuição humana não seria suficiente, e em decisões que requerem precisão e otimização. Eles ajudam a integrar diversas fontes de informação, fornecem acesso inteligente ao conhecimento relevante e auxiliam no processo de estruturar decisões (PRASAD E RATNA, 2018)

No contexto de gestão dos recursos naturais há cada vez mais uma variedade de tomadores de decisão cujos pontos de vista conflitantes devem ser levados em conta. O meio ambiente é seriamente impactado por decisões de investimento e gestores são cada vez mais forçados a agir com base em suas responsabilidades sociais pelo futuro do planeta. As decisões de investimento não devem, contudo, basear-se apenas nas opiniões dos gestores, que tendem a se concentrar em fatores econômicos, mas devem se basear em informação concreta (GOMES et al., 2008)

Silva, Falsarella e Mariosa (2022) apontam que com o auxílio de TIC e SAD no contexto de gestão dos recursos hídricos através do monitoramento de bacias hidrográficas, considerando as fases do ciclo de vida da água, incluindo a geração por meio de ciclos hidrológicos naturais, retenção e armazenamento, captação e tratamento, distribuição e consumo, e tratamento e devolução para reuso, em conjunto ao instrumento de gestão PBH em vigência com o objetivo de assegurar disponibilidade e qualidade de água, os gestores são capazes de antecipar cenários futuros, receber sugestões para medidas a serem adotadas, ampliar a vigilância das áreas de bacias hidrográficas e identificar variações nos valores padrão de parâmetros, permitindo correções no sistema e avaliar se os projetos e ações propostos pelo PBH são adequados e eficazes.

2.3.2. Tecnologias inovadoras

Conforme Rodrigues et al. (2014), alguns especialistas afirmam que a crise hídrica enfrentada no século XXI está mais relacionada à gestão do uso da água do que à sua

escassez. Dessa forma, Souza Filho (2015) destaca que o desafio premente para organizações e a sociedade é desenvolver tecnologias que possibilitem o planejamento, a concepção de projetos e a operacionalização de sistemas hídricos, visando à promoção do uso sustentável da água em diversas regiões hidrográficas do Brasil.

Jannuzzi, Falsarella e Sugahara (2014) salientam a relevância da informação como um recurso essencial para aprimorar a gestão dos recursos hídricos. Eles enfatizam que é fundamental o processamento desses dados por meio de SI. Dessa forma, compreender os sistemas informatizados torna-se crucial, pois eles se tornam progressivamente indispensáveis no contexto da gestão, proporcionando uma base sólida para a tomada de decisões e o gerenciamento eficaz desses recursos.

Porto e Porto (2008) apontam que os sistemas de gestão dependem, na prática, de instrumentos desenvolvidos e aplicados para atender às expectativas da comunidade, respeitando os limites naturais das bacias hidrográficas, tanto para objetivos de utilização do bem quanto para preservação ambiental. A garantia da sustentabilidade a médio e longo prazos exige um equilíbrio ideal entre essas perspectivas, mas a eficácia do sistema de gestão só pode ser avaliada plenamente através da aplicação concreta de instrumentos e sistemas de apoio. Assim, apesar do avanço tecnológico, é crucial tornar operacionais, inclusive em termos institucionais, os sistemas e seus respectivos mecanismos de decisão. (PORTO e PORTO, 2008, p. 54).

O uso de TIC é essencial, portanto, para que seja possível garantir a eficácia da gestão dos recursos hídricos e das metas estabelecidas pelo PBH. Uma das tecnologias úteis para a gestão dos recursos hídricos é o IoT para auxiliar na coleta de dados. A integração da IoT tem propiciado a economia de recursos, resultando em maior sustentabilidade nessas áreas. Neves (2021) define a IoT como a interação entre objetos cotidianos conectados à internet, caracterizando-os como inteligentes devido à sua capacidade de trocar, gerar e processar dados por meio de comunicação sem fio, dispensando intervenção humana.

Zabadal e Castro (2017) abordam a internet como uma forma revolucionária de comunicação digital entre seres humanos e destacam a IoT como uma evolução desse meio, permitindo a conexão inteligente de objetos cotidianos através da internet. Essa conectividade possibilita o controle e a troca de dados entre esses objetos, com aplicações em diversas esferas sociais, como saúde e cidades inteligentes. A estrutura dos objetos inteligentes, conforme os autores, compreende quatro elementos: fonte de energia para alimentar os componentes, sensores para monitoramento ambiental e funções específicas, processamento e

memória para armazenamento de dados, e comunicação sem fio (ZABADAL e CASTRO, 2017).

Conforme Pincheira et al. (2020), atualmente, o IoT pode oferecer dispositivos de sensoriamento energeticamente eficientes incorporados aos sistemas de distribuição de água, aproveitando os avanços recentes em tecnologias de Redes de Área Ampla de Baixa Potência (LPWAN), permitindo o uso desses dispositivos em larga escala e áreas remotas na gestão dos recursos hídricos com impacto econômico mínimo.

Os sistemas modernos de IoT, de acordo com Lin et al. (2017), geralmente consistem em vários componentes, cada um com restrições e capacidades únicas. Uma arquitetura tecnológica clássica de 3 camadas sendo elas a Camada do Dispositivo, Camada Edge e Camada Cloud. Na camada do Dispositivo agrupando dispositivos de sensoriamento capazes de adquirir dados do mundo físico, tipicamente pequenos e modos de baixo consumo de energia em detrimento de capacidades poderosas, como poder computacional, memória e conectividade. A camada Edge (ou Gateway) reúne dispositivos menos restritos, fornecendo conectividade e poder computacional adicionais. Por fim, a camada Cloud representa servidores responsáveis pelo processamento e armazenamento dos dados coletados em tempo real.

Santos (2023) realizou um estudo onde foi implementada uma rede de IoT no Rio Solimões, na região da cidade de Tefé-AM, visando estabelecer um sistema de comunicação eficiente em áreas remotas da Amazônia. O experimento utilizou dispositivos LoRa Transmissor e Receptor, instalados em um barco e em uma casa ribeirinha, respectivamente, configurando uma rede de comunicação par a par. Os resultados obtidos demonstraram a viabilidade da transmissão de dados mesmo em um ambiente desafiador, com a manutenção do enlace de comunicação durante os testes realizados a diferentes velocidades de navegação. A comunicação foi estabelecida com distâncias que atingiram até 1.563 metros e tempos de conectividade que variaram conforme a posição do barco em relação à margem. Essas evidências sugerem que a tecnologia IoT aplicada ao contexto fluvial pode ser uma alternativa viável para mitigar a falta de infraestrutura de comunicação na região amazônica.

O monitoramento de ambientes é uma função que pode ser significativamente aprimorada pelo uso de IoT, como evidenciado por Braga et al. (2017), que definem o status do ambiente por meio da verificação de grandezas ambientais, como temperatura e umidade, além de monitorar o gerador de energia elétrica. Segundo os autores, os sensores capturam dados sobre a temperatura, umidade e o nível de tensão da rede elétrica, com o objetivo de reduzir o consumo energético e manter a confiabilidade das medições.

Silva, Falsarella e Mariosa (2022) acrescentam que ao utilizar IoT como ferramenta de apoio é gerado um imenso volume de dados, proveniente dos objetos inteligentes interconectados que constantemente trocam dados via sensores e conectados com a internet, o que acarreta na demanda por tecnologias capazes de processá-los de maneira escalável e adaptativa.

Outra tecnologia útil dentro do contexto de gestão dos recursos hídricos é o Big Data, que permite lidar com essa quantidade crescente de dados de forma eficiente e proporcional ao seu volume e variedade.

De acordo com Luvizan et al. (2014), a pesquisa sobre grandes volumes de dados remonta à década de 70, com estudos sobre métodos de processamento, e se intensificou a partir dos anos 90, abordando modelagem e desenvolvimento de software para volumes significativos. Os anos 2000 marcaram um salto tecnológico e uma explosão na geração de dados, levando a criação do Big Data, que combina questões clássicas e novas em um novo contexto tecnológico, social e econômico. A definição de Big Data abrange o processamento de volumes que excedem a capacidade das ferramentas tradicionais, destacando elementos como volume, velocidade, variedade, valor e veracidade dos dados.

O Big Data surge da necessidade de processar grandes volumes de dados, estruturados e não estruturados, em tempo hábil, dado o crescimento constante dessa informação. Sua definição é flexível, abarcando múltiplos significados, mas geralmente é compreendido pela combinação dos cinco V's: Volume, referente à quantidade de dados gerados; Variedade, que inclui fontes e tipos diversos de dados; Velocidade, relacionada à rapidez na geração destes dados; Veracidade, garantindo a autenticidade das informações; e Valor, representando o potencial valor agregado por meio da análise desses dados. Desafios como os 5 V's do Big Data foram identificados, enquanto os usuários buscam magnetismo, agilidade e profundidade nas ferramentas de Big Data para atrair dados, adaptar-se à evolução dos dados e obter análises detalhadas. (TAURION, 2013).

Conforme Nesello et al. (2019), o Big Data é resultado do avanço da computação móvel, redes sociais e computação em nuvem, originando um volume imenso de dados, impulsionando a necessidade de ferramentas específicas para análise e gestão e transformação em informações úteis, portanto caracteriza-se como uma ferramenta com capacidade de analisar dados brutos e não estruturados, permitindo prever eventos detalhados ao redor do mundo.

Nie et al. (2020) assumem que há uma grande quantidade de informações envolvendo a gestão dos recursos hídricos, o que torna cada vez mais necessária a utilização de

tecnologias de apoio, o que permite o processamento desses dados de forma rápida e econômica. A vantagem da aplicação das tecnologias Big Data e IoT está no grande número de modelos que pode ser construído para muitos segmentos com base nas informações disponíveis, sendo instrumentos importantes para avaliar, executar e agendar redes de distribuição de água atuais a longo prazo, o que auxilia na previsão e monitoramento de distribuição de água, incluindo a coleta, armazenamento, análise e visualização de Big Data e sensores IoT para melhorar e gerenciar seus processos e estratégias de desenvolvimento.

Belluzzo e Igarashi (2016) também destacam as aplicações de Big Data em Cidades Inteligentes, apontando benefícios como a possibilidade de casas inteligentes que podem prevenir incêndios, monitorar e otimizar o consumo de água, eletricidade e gás, reduzindo assim os impactos ambientais. Além disso, as informações climáticas podem melhorar as previsões sobre umidade do ar, chuvas, níveis de rios, lagos e barragens, pressão atmosférica, velocidade do vento e temperaturas máximas e mínimas, facilitando a prevenção de enchentes e a gestão do consumo de água. A análise da poluição e a detecção de gases tóxicos no ar também podem gerar alertas para a população e para as indústrias responsáveis, prevenindo danos à saúde.

O cenário atual proporciona abordagens inovadoras, e além do IoT e Big Data surge a possibilidade de aplicações de Inteligência Artificial (IA), que oferecem potencial significativo para melhorar a gestão hídrica por meio de dados em tempo real, análise eficiente e tomada de decisões baseada em dados. Dentro do contexto de análise de um grande volume de dados e a necessidade de busca por ferramentas capazes de processá-los, Ruiz (2018) indica inteligência artificial como uma alternativa, por permitir que máquinas aprendam e tomem decisões futuras baseadas em dados armazenados e históricos de forma automática e precisa.

A Inteligência Artificial permite monitoramento e análise em tempo real dos recursos hídricos, facilitando a tomada de decisões baseada em dados e a otimização da alocação e previsão da demanda de água. Por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, é possível prever a qualidade da água e alocar recursos hídricos com base em dados em tempo real, enquanto o Big Data fornece novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos, aproveitando grandes volumes de dados de fontes diversas, como sensoriamento remoto, dispositivos IoT e mídias sociais. A integração dessas tecnologias pode promover práticas sustentáveis e eficazes de gestão hídrica, garantindo a segurança hídrica e a proteção dos ecossistemas aquáticos, enquanto oferece soluções inovadoras para os desafios enfrentados (KAMYAB et al., 2023).

Conforme Kamyab et al. (2023), diversas tecnologias baseadas em IA são aplicáveis à gestão de recursos hídricos, cada uma com suas próprias capacidades e limitações. Duas dessas tecnologias são o Machine Learning e o Deep Learning (aprendizado profundo). Lowe et al. (2022) aponta que o Machine Learning permite que os computadores aprendam com os dados e façam previsões ou tomem decisões com base nesse aprendizado. No contexto da gestão de recursos hídricos, algoritmos de aprendizado de máquina podem ser utilizados para analisar dados de sensores de qualidade da água, infraestrutura hídrica e outras fontes, detectando mudanças na qualidade da água e prevendo padrões de uso da água.

Vargas-Crispin et al. (2021) apontam que o Machine Learning tem sido bem-sucedido na formulação de modelos hidro meteorológicos e na criação de modelos voltados para a otimização de recursos, máquinas e processos e que, apesar de demandarem mais tempo e investimento com abordagens empíricas e mecanizadas, a utilização conjunta de computadores e modelos baseados em Machine Learning representa uma economia significativa de tempo e recursos, delineando uma nova era voltada para a inteligência artificial e suas aplicações.

Já o deep learning, de acordo com Paixão et al. (2022), é inspirado nas redes neurais do cérebro humano, mas compostas por camadas de neurônios artificiais, que processam e transformam dados e estão interconectados. em contraste com abordagens mais tradicionais de aprendizado de máquina, destaca-se por processar modelos computacionais mais complexos, caracterizados por Redes Neurais Artificiais (RNAs) com múltiplas camadas de processamento. Esses modelos, semelhantes às RNAs convencionais, diferenciam-se pela presença de um maior número de camadas ocultas e, conseqüentemente, uma maior quantidade de conexões sinápticas. Cada camada sucessiva desses modelos é responsável por reproduzir representações dos dados originados da camada anterior, com algoritmos de aprendizado tanto supervisionados quanto não supervisionados.

A deep learning, de acordo com Keleko (2022) é um subconjunto da IA, tem se destacado como uma técnica poderosa para decifrar padrões complexos e fazer previsões precisas a partir de conjuntos de dados massivos. Ele oferece uma abordagem inovadora para enfrentar desafios associados à disponibilidade, qualidade, distribuição e saúde ecológica da água, sendo capaz de analisar grandes conjuntos de dados de parâmetros de qualidade da água para detectar incidentes de poluição, contaminação química e surtos bacterianos, além de auxiliar na previsão de enchentes, monitoramento da saúde das plantas durante a seca e previsão de eventos futuros relacionados à água. Essas tecnologias têm o potencial de facilitar

uma gestão mais precisa, rápida e proativa dos recursos hídricos, garantindo a o monitoramento das situações das bacias hidrográficas.

De acordo com Silva (2023), estudos recentes demonstram a eficácia da inteligência artificial no monitoramento da qualidade da água em rios. Gholami et al. (2017) aplicaram redes neurais artificiais (ANN) para prever a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos totais (SST) e oxigênio dissolvido (OD) com mais de 90% de precisão, enquanto Ali et al. (2023) utilizaram o algoritmo Random Forest para prever a qualidade da água em um rio na Índia, atingindo 88,7% de acurácia. Já Kumar et al. (2022) empregaram Support Vector Machine (SVM) na detecção de metais pesados, obtendo 94,9% de precisão. Além disso, Kim et al. (2023) destacam o uso da IA no monitoramento de poluentes emergentes, como fármacos, e Chen et al. (2020) aplicaram Deep Learning para prever sua concentração na água, alcançando 92% de sucesso, evidenciando o potencial dessas tecnologias para gestão ambiental. Estes dados levantados comprovam a efetividade da aplicação da tecnologia IA na gestão dos recursos hídricos.

Outra tecnologia possível de se aplicar no contexto de gestão dos recursos hídricos é a Blockchain. De acordo com Paiva Sobrinho et al. (2019), o desenvolvimento tecnológico do Blockchain e dos contratos inteligentes oferece uma promissora oportunidade para aprimorar a gestão de recursos hídricos por armazenar dados em blocos interconectados e seguros por criptografia, não se limita apenas à criptomoeda Bitcoin popularmente conhecida, mas oferece a possibilidade de ser aplicada na resolução de problemas complexos, como a administração de bacias hidrográficas.

Pincheira et al. (2020), apontam que a tecnologia Blockchain oferece uma combinação única de recursos, como abertura, transparência, auditabilidade, que podem beneficiar diretamente vários processos relacionados à IoT. Esses recursos são particularmente atraentes quando a tecnologia IoT monitora e gerencia recursos como água e energia. Alguns estudos propõem o uso da Blockchain em sistemas de gestão de água e energia, desde a criação de plataformas de negociação baseadas em tokens até abordagens de gamificação para incentivar o consumo consciente de água, todos aproveitando a transparência da Blockchain para prevenir comportamentos desonestos e promover a confiança entre os membros da comunidade.

Paiva Sobrinho et al. (2019) destacam que aplicar a tecnologia Blockchain pode contribuir para o aumento da resiliência, eficácia, eficiência, confiança e comprometimento na governança dos recursos hídricos dentro do contexto de bacias hidrográficas. Essas inovações podem tornar a governança hídrica menos suscetível aos efeitos adversos de crises

econômicas, financeiras e fiscais, além de mais transparente e menos propensa à corrupção, estimulando ainda maior participação da sociedade na gestão dos recursos hídricos. Neste momento, um passo importante seria incentivar a disseminação dessas inovações na sociedade, destacando seu potencial para resolver problemas socioecológicos complexos.

Blockchain, uma tecnologia descentralizada e sem intermediários, tem se destacado nas transações financeiras globais pela segurança, rapidez, inviolabilidade, imutabilidade e descentralização que oferece. Giesel e Nobre (2021) afirmam que a tecnologia Blockchain foi iniciada em 2009 com a primeira transação de bitcoin por Nakamoto, a Blockchain inicialmente empregava o processo de prova de trabalho, evoluindo para métodos de verificação mais diversos ao longo do tempo. A introdução do processo de prova de participação em 2015, originário do Ethereum, simplificou a verificação descentralizada, melhorando o desempenho e reduzindo o consumo de energia, o que permitiu a implementação dos smart contracts, programas que aumentam a segurança das transações ao eliminar a interferência de terceiros.

Blockchain, assim como a Internet revolucionou a comunicação, promovendo transações confiáveis por meio de um sistema distribuído composto por diversos nós que se comunicam entre si. Braga et al. (2017) descrevem a tecnologia Blockchain como um registro compartilhado e imutável para registrar o histórico de transações, permitindo que partes com confiança limitada mantenham um conjunto de estados globais. O Blockchain é disseminado por toda a rede de sistemas computacionais interconectados, podendo ser não autorizado e público, como o utilizado pela criptomoeda Bitcoin, ou autorizado, privado e priorizado, como no caso de aplicações comerciais.

Normalmente, uma solução Blockchain é composta por três camadas principais: a Camada de Dados, que inclui o Hyperledger Fabric; a Camada de Aplicação de Negócios, que interage com a rede Hyperledger Fabric, incluindo servidores de aplicação; e a Camada de Apresentação, que abrange a aplicação e interface do usuário (BRAGA et al., 2017). Com o apoio da tecnologia Blockchain é possível avaliar a eficiência das metas e ações realizadas conforme estabelecidas pelo PBH assegurando a veracidade dos dados que ficaram registrados de forma imutável pelos SAD, tornando possível e facilitado o rastreo das informações.

Sobrinho et al. (2019) apresentam a possibilidade de aplicação da tecnologia blockchain na gestão de recursos hídricos por meio de esquemas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), permitindo a compensação econômica a provedores de serviços ecossistêmicos com moedas complementares descentralizadas. Suas principais vantagens

incluem independência do sistema bancário, integração da comunidade e estímulo à economia local. Além disso, a descentralização e a segurança do blockchain aumentam a transparência e reduzem fraudes. No entanto, o estudo destaca desafios na adoção da tecnologia, exigindo sua assimilação pelos diferentes stakeholders da gestão hídrica. Com este caso de uso é possível considerar o desenvolvimento novas aplicações como o registro imutável dos dados gerados por um SAD.

Outra tecnologia que pode auxiliar na gestão dos recursos hídricos é a Realidade Virtual (RV), uma interface de terceira geração para aplicações computacionais, permitindo ao usuário interagir em tempo real com um ambiente tridimensional sintético através de dispositivos multissensoriais. De acordo com Netto et al. (2002), a origem remonta ao desenvolvimento do primeiro sistema gráfico interativo por Ivan E. Sutherland, que introduziu o conceito de RV nos anos 60.

A concepção inicial de RV remonta à década de 1950, quando o cineasta Morton Heilig imaginou o "cinema do futuro" e criou o SENSORAMA, um dispositivo que proporciona imersão sensorial por meio de sensações como movimento, som, odor e visão estereoscópica. Na década de 1960, o engenheiro Ivan Sutherland construiu o primeiro capacete de RV, precursor de pesquisas que culminaram nas aplicações modernas de RV. Foi somente na década de 1980 que Jaron Lanier cunhou o termo "Realidade Virtual", buscando a fusão do real com o virtual (NETTO et al., 2002).

Os sistemas de RV buscam estimular ao máximo o usuário, proporcionando-lhe uma sensação de presença no mundo virtual. Para isso, integram dispositivos sofisticados, como luvas de dados e capacetes imersivos, que permitem ao usuário explorar um mundo tridimensional sob seis graus de liberdade. Além disso, de acordo com Pimentel (1995), a RV tem sido impulsionada por avanços tecnológicos e pela queda dos custos, tornando-a acessível a uma variedade de aplicações. No Brasil, diversos grupos de pesquisa têm contribuído para o desenvolvimento e popularização da RV, com trabalhos que vão desde modelagem dinâmica de mundos virtuais até a criação de sistemas distribuídos de RV (PIMENTEL, 1995).

Embora a RV tenha mais de 30 anos, sua evolução tem sido substancial, tornando-se cada vez mais acessível e sofisticada. A tecnologia está sendo explorada em uma ampla gama de áreas, desde a medicina até a agricultura, impulsionando a inovação e a pesquisa em todo o mundo, como é o caso da aplicação na gestão dos recursos hídricos (BOTEGA; CRUVINEL, 2009).

O avanço da multimídia e da RV, impulsionado pela maior capacidade dos computadores, tem permitido a integração em tempo real de vídeo e ambientes virtuais

interativos. Além disso, o aumento da largura de banda das redes de computadores tem contribuído para a evolução da multimídia, viabilizando a transferência eficiente de imagens e outros fluxos de informação. Com isso, a Realidade Aumentada (RA) tem se beneficiado, enriquecendo o ambiente físico com objetos virtuais e possibilitando aplicações tanto em plataformas sofisticadas quanto populares (TORI et al., 2006).

Tori et al. (2006) apontam que diferentemente da RV, que transporta o usuário para um ambiente virtual, a RA mantém o usuário em seu ambiente físico, trazendo o ambiente virtual para seu espaço e permitindo interações mais naturais, sem a necessidade de treinamento prévio. Novas interfaces multimodais estão sendo desenvolvidas para facilitar a manipulação de objetos virtuais no espaço do usuário, seja utilizando as mãos ou dispositivos mais simples de interação.

A RA permite a sobreposição de elementos virtuais ao mundo real, possibilitando cenários imaginários e reproduções fiéis de ambientes da vida real, como universidades virtuais e bancos virtuais. Essa tecnologia, inserida em um contexto mais amplo chamado de realidade misturada, combina o mundo real com o virtual, utilizando técnicas computacionais para criar ambientes cada vez mais realistas e interativos. Assim, a RA promete revolucionar não apenas a maneira como as pessoas interagem com o ambiente digital, mas também a forma como aprendem, ensinam e se relacionam com a informação (TORI et al., 2006).

De acordo com Cadavieco et al.(2014), a RA permite a sobreposição de elementos virtuais em imagens do mundo real em tempo real, podendo incorporar sistemas de GPS para localização precisa do usuário. Existem três abordagens principais para o uso do software de RA: no primeiro tipo, dados geográficos e outras informações da Internet são sobrepostos a uma imagem; no segundo tipo, dados relacionados a um padrão específico são adicionados à imagem original, como instruções de manuseio de um equipamento; e no terceiro tipo, a imagem é comparada com outras na Internet para incorporar informações adicionais, como reconhecimento facial.

A RA pode ser aplicada em diversos contextos, desde fornecer informações sobre locais específicos até aprimorar a experiência de leitura em livros interativos, oferecendo uma maneira inovadora de apresentar e interagir com informações. Dentro do contexto de gestão de recursos hídricos pode enriquecer o entendimento das situações das bacias hidrográficas por ter uma interface interativa e de fácil entendimento além de possibilitar que os gestores verifiquem em tempo real a situação das bacias hidrográficas à distância.

Há um estudo comprovando que a aplicação da RV e da RA no ensino de Geografia pode potencializar a compreensão de conceitos complexos, como a estrutura e dinâmica das

bacias hidrográficas. De acordo com Hayakawa et al. (2024), a prototipação e impressão 3D da bacia do rio Lageado Grande já demonstram a eficácia da materialização do relevo para facilitar a abstração geográfica. Com a integração de RV e RA, seria possível aprimorar essa experiência ao permitir que os alunos visualizem e interajam virtualmente com os diferentes aspectos da bacia hidrográfica, como declividade do relevo, rede de drenagem e impactos ambientais. A RA poderia sobrepor informações dinâmicas, como fluxos de água ou mudanças no uso do solo, enquanto a RV possibilitaria imersão em um ambiente tridimensional que simula a geografia da região. Essa abordagem inovadora proporciona um aprendizado mais envolvente e interativo, conectando os usuários ao espaço vivido e favorecendo o desenvolvimento de uma compreensão espacial crítica e aprofundada.

Portanto, as tecnologias emergentes desempenham um papel crucial na gestão eficaz dos recursos hídricos, oferecendo soluções inovadoras para os desafios enfrentados. O avanço das TIC possibilita o desenvolvimento e aplicação de SAD que, por sua vez, podem ser associados à diversas tecnologias, como IoT e o Big Data, no processo de captação de dados em tempo real análises avançadas, a aplicação de IA, incluindo Machine Learning e Deep Learning, para processar grandes volumes de dados e tomar decisões baseadas em dados para otimizar a gestão hídrica, ao passo que Blockchain que garante a transparência e a segurança de informações na gestão dos recursos hídricos, enquanto RV e a RA proporcionam interfaces interativas e imersivas para compreender e visualizar melhor as bacias hidrográficas.

Em suma, essas tecnologias têm o potencial de revolucionar o monitoramento de situação das bacias hidrográficas e prever situações emergenciais, além de monitorar as medidas dos PBH através de indicadores fornecidos pelo SAD alimentados pelas TIC que podem ser reavaliados de acordo com a situação dos recursos hídricos.

2.4. Plano de bacias hidrográficas

2.4.1. Conceitos e legislação

A PNRH, instituída pela Lei nº 9.433/97, conhecida como Lei das Águas, promoveu significativas mudanças na gestão hídrica no Brasil, uma vez que introduziu instrumentos para a administração de recursos hídricos de abrangência federal e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). A PNRH é caracterizada por sua descentralização, integrando União e estados, e por sua natureza participativa, com a criação de comitês de bacias hidrográficas que envolvem poderes públicos, usuários e sociedade civil na gestão hídrica. Essa abordagem moderna permitiu a

identificação de conflitos relacionados ao uso da água, com arbitragem administrativa por meio dos planos de recursos hídricos das bacias hidrográficas (BRASIL, 1997).

Faria e Faria (2004) descrevem que a legislação federal estabelece os princípios, as diretrizes e os instrumentos necessários para a implementação de uma política de regulação do uso dos recursos hídricos no Brasil com o principal objetivo de garantir o uso racional e integrado dos recursos hídricos, assegurando não apenas a atual, mas também as futuras gerações, o acesso à água com padrões aceitáveis de qualidade.

Um dos principais componentes do SNGRH é o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), órgão normativo e deliberativo máximo, composto pelos Ministérios e Secretarias da Presidência da República, dos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos, dos usuários e das organizações civis de recursos hídricos. A Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), do Ministério do Meio Ambiente, atua como Secretaria Executiva do CNRH, e a ANA que representa o principal órgão executor da PNRH, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente, com autonomia administrativa e financeira, responsável por supervisionar, controlar e implementar os instrumentos da política, incluindo a outorga do direito de uso dos corpos de água da União e a cobrança pelo uso dos recursos hídricos (FARIA & FARIA, 2004).

De acordo com ANA, a Lei das Águas, ao ampliar o alcance do Código de Águas de 1934, que centralizava a gestão hídrica no setor elétrico, estabeleceu como princípio fundamental o respeito aos usos múltiplos da água, priorizando o abastecimento humano e a dessedentação animal em períodos de escassez. A democratização da gestão dos recursos hídricos foi consolidada com a aprovação da PNRH, em 2006, pelo CNRH, elaborado de forma participativa e envolvendo ampla mobilização social, constitui um instrumento norteador que estabelece diretrizes, metas e programas para a gestão das águas no país, sendo acompanhado regularmente pelo Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos a cada quatro anos (BRASIL, 1997).

Os CBH são fóruns de discussão e decisão sobre questões relacionadas aos recursos hídricos em cada bacia, com responsabilidades como promover o debate, arbitrar conflitos, aprovar e acompanhar a execução dos Planos de Recursos Hídricos, e estabelecer mecanismos de cobrança pelo uso dos recursos. Ademais, as Agências de Água atuam como secretarias executivas dos Comitês para avaliar a viabilidade financeira assegurada pela cobrança pelo uso dos recursos hídricos. De acordo com Muñoz (2000), esse modelo institucionaliza uma gestão participativa em níveis estadual, federal e de base, representando um avanço significativo na gestão dos recursos hídricos do país ao estabelecer uma gestão por

bacias hidrográficas e promover a negociação contínua entre os diversos interesses em conflito.

A PNRH propõe seis instrumentos para alcançar seus objetivos, sendo estes: os Planos de Recursos Hídricos; o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água; a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos; a cobrança pelo uso de recursos hídricos; a compensação a municípios e o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Dentre os instrumentos de gestão, os Planos de Bacias Hidrográficas são cruciais para articular o planejamento e a gestão dos recursos hídricos. Esses planos, elaborados por bacia, estado e país, estabelecem diagnósticos, prognósticos, metas, programas e projetos para o gerenciamento dos recursos hídricos, com aprovação e acompanhamento pelo CBH (PERES e SILVA, 2012).

A Resolução CNRH No 145/2012 (BRASIL, 2012) do Plano Nacional de Recursos Hídricos estabelece que CBH, que são as instâncias de gestão dos recursos hídricos das bacias hidrográficas, responsáveis pelas decisões sobre a elaboração de seus Planos de Bacia individuais, sendo responsabilidade de cada comitê promover a articulação necessária para essa elaboração, acompanhar os trabalhos relacionados e aprovar os planos, enquanto a elaboração e implementação desses planos são atribuições das Agências de Água.

Pizella (2015) destaca que o envolvimento dos municípios na elaboração do PBH é crucial em diversas etapas do processo, como na fase diagnóstica, por exemplo, o CBH necessita coletar uma variedade de informações junto aos órgãos responsáveis pela concessão de usos dos recursos hídricos aos municípios, incluindo dados sobre mananciais, qualidade da água, saneamento básico e gestão de resíduos sólidos urbanos, informações fundamentais para compreender a situação atual dos recursos hídricos, as pressões exercidas sobre eles e as demandas dos diversos usos na bacia. Além disso, os municípios desempenham um papel significativo na elaboração do prognóstico do PBH, estabelecendo metas de curto, médio e longo prazo para a região que visam a melhoria progressiva da qualidade e quantidade dos recursos hídricos, afetando diretamente as áreas de atuação municipal.

Pizella e Souza (2013) complementam que a PNRH prevê a elaboração de Planos de Recursos Hídricos (PRH) como um de seus principais mecanismos, de caráter diretor de longo prazo, fundamentais para a implementação e gestão da política nacional, podendo ser elaborados por bacia hidrográfica, estado ou país, com destaque para os PBH, de responsabilidade dos CBH. Para assegurar a efetiva consideração das variáveis ambientais ao longo do processo de elaboração do PBH, é essencial identificar os fatores ambientais, as suscetibilidades e as vocações ambientais, além de avaliar alternativas para alcançar as metas

estabelecidas, considerando os possíveis impactos ambientais, através de metas e indicadores. Além disso, a compatibilidade com políticas, planos e programas existentes em níveis federal, regional e municipal é crucial para garantir a coerência e eficácia das ações relacionadas à gestão dos recursos hídricos.

Os Planos de Bacia Hidrográfica são essenciais para a gestão das águas, exigindo que estejam diretamente ligados à gestão regional e urbana, servindo como referência para a aplicação de outros instrumentos de gestão, conforme Leal (2003). A implementação desses planos requer a integração das políticas locais de uso, ocupação e conservação do solo, meio ambiente e saneamento básico com as políticas federais e estaduais de recursos hídricos, conforme preconiza a PNRH. Portanto, os Planos de Bacia Hidrográfica são cruciais para a gestão dos recursos hídricos e para promover uma abordagem integrada e sustentável do uso dos recursos naturais, como é o caso do Plano de Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PBH PCJ).

2.4.2. Plano de Bacias Hidrográficas PCJ

Conforme Sugahara et al. (2020), o PBH PCJ 2020 a 2035 foi construído através das etapas de revisão e atualização do anterior PBH PCJ 2010-2020 e elaboração de cinco cadernos temáticos sobre os temas: Garantia do Suprimento Hídrico; Educação Ambiental, Integração e Difusão de Pesquisas e Tecnologias; Conservação e Uso da Água no Meio Rural e Recuperação Florestal; Águas Subterrâneas; e Enquadramento dos Corpos d'Água Superficiais pelo Comitês das Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH PCJ) em conjunto à duas empresas.

O processo de elaboração do PBH PCJ 2020 a 2035 consistiu em um processo decisório aberto, integrando a equipe técnica responsável, as Câmaras Técnicas dos CBH PCJ e a participação da sociedade, mediante audiências públicas, antes da conclusão que se deu com a aprovação pelo Plenário dos CBH PCJ do Relatório Final e do Relatório Síntese do PBH PCJ 2020-2035 (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2020).

O PBH PCJ 2020 a 2035 (COMITÊS PCJ, 2020), é caracterizado como uma política pública em execução (PEX) atrelada a outras políticas públicas em execução de gestão das águas, como a PNRH, Lei Nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997). O PBH PCJ compreende medidas como a elaboração e execução de Planos de Controle e Redução de Perdas, Programas de Reuso da Água e Políticas de Gestão, dentre outras ações, visando o aproveitamento sustentável dos recursos hídricos, considerando a complexidade do sistema hídrico.

No Quadro 2 são apresentados, de acordo com o PBH PCJ 2020 a 2035, os Temas Estratégicos que são divididos em seis categorias, sendo elas o Enquadramento dos Corpos D'água Superficiais; Garantia de Suprimento Hídrico e Drenagem; Conservação e Uso do Solo e da água no Meio Rural e Recomposição Florestal; Águas Subterrâneas; Educação Ambiental, Integração e Difusão de Pesquisas de Tecnologias e Gestão dos Recursos Hídricos, com seus respectivos eixos e ações para serem cumpridas, totalizando 120 ações.

Quadro 2 - Plano de Ações em Tema Estratégico, Eixos e Programas e número de ações do PRH PCJ 2020 a 2035.

Temas Estratégicos, Eixos e Programas	Nº de ações
Enquadramento dos Corpos d'Água Superficiais	29
Eixo Temático 1: Universalização da coleta e do tratamento de esgotos	10
Programa 1.1.: Ampliação da coleta e do afastamento de esgoto sanitário	5
Programa 1.2.: Ampliação da capacidade de tratamento	5
Eixo Temático 2: Estratégias para implantação de tratamento terciário	12
Programa 2.1.: Elaboração de estudos e projetos para implantação de sistemas e adequação do tratamento visando a remoção de nutrientes	9
Programa 2.2.: Elaboração de estudos, projetos e implantação de sistemas e adequação do tratamento visando à desinfecção de efluentes	3
Eixo Temático 3: Estratégias para remoção de cargas poluidoras de origem difusa	6
Programa 3.1.: Estudos e estratégias de mitigação de cargas difusas	3
Programa 3.2.: Abatimento de carga difusa de origem rural e urbana	3
Eixo Temático 4: Capacitação em saneamento	1
Programa 4.1.: Capacitação dos Operadores de Saneamento	1
Garantia de Suprimento Hídrico e Drenagem	16
Eixo Temático 1: Fortalecimento institucional, planejamento e gestão de recursos hídricos	4
Programa 1.1.: Redução de incertezas na disponibilidade hídrica das bacias PCJ	1
Programa 1.2.: Simulação hidrodinâmica de trechos críticos para nível d'água	3
Eixo Temático 2: Projetos especiais de caráter regional	4
Programa 2.1.: Plano diretor de reúso para as Bacias PCJ	1
Programa 2.2.: Planos regionais de minimização do risco de inundações ribeirinhas	1
Programa 2.3.: Acompanhamento e apoio aos projetos de obras em desenvolvimento nas Bacias PCJ	1

Programa 2.4.: Estudos regionais de aumento de disponibilidade hídrica nos rios Atibaia, Jundiá e Capivari	1
Eixo Temático 3: Apoio aos municípios das Bacias PCJ	8
Programa 3.1.: Alternativas de aumento de disponibilidade hídrica em sistemas isolados	2
Programa 3.2.: Continuidade e fortalecimento de ações em água e esgoto	4
Programa 3.3.: Desenvolvimento do setor de drenagem e manejo de águas pluviais	2
Conservação e Uso do Solo e da Água no Meio Rural e Recomposição Florestal	16
Eixo Temático 1: Proteção de Mananciais e Recomposição Florestal	9
Programa 1.1.: Diagnóstico de adequação ambiental	1
Programa 1.2.: Recuperação de nascentes, matas ciliares e áreas de recarga	7
Programa 1.3.: Pagamento por serviços ambiental	1
Eixo Temático 2: Promoção do Uso Eficiente da Água e Conservação do Solo no Meio Rural	4
Programa 2.1.: Uso da água e conservação do solo na agricultura	2
Programa 2.2.: Zoneamento hidroagrícola	2
Eixo Temático 3: Saneamento Rural	3
Programa 3.1.: Esgotamento sanitário, Resíduos Sólidos e Abastecimento	3
Águas Subterrâneas	12
Eixo Temático 1: Informação em recursos hídricos	2
Programa 1.1.: Banco de dados e Suporte a Decisões	2
Eixo Temático 2: Planejamento e desenvolvimento científico em escala regional	6
Programa 2.1.: Expansão do conhecimento hidrogeológico nas Bacias PCJ para a gestão	3
Programa 2.2.: Estudos hidrogeológicos de detalhe no Aquífero Tubarão	1
Programa 2.3.: Gestão integrada de recursos hídricos superficiais e subterrâneos	1
Programa 2.4.: Estudo de viabilidade sobre recarga artificial dos aquíferos nas Bacias PCJ	1
Eixo Temático 3: Planejamento e desenvolvimento científico em escala urbana	4
Programa 3.1.: Avaliação da potencialidade hídrica subterrânea para o abastecimento municipal em situações de escassez hídrica	1
Programa 3.2.: Identificação de áreas de restrição e controle	1
Programa 3.3.: Estudos hidrogeológicos de vulnerabilidade natural e risco de contaminação dos aquíferos	1
Programa 3.4.: Delimitação dos perímetros de alerta de poços de abastecimento público	1
Educação Ambiental, Integração e Difusão de Pesquisas e Tecnologias	12

Eixo Temático 1: Fortalecimento institucional, planejamento e gestão de recursos hídricos	3
Programa 1.1.: Fortalecimento da comunicação dos Comitês PCJ e seus públicos de interesse	1
Programa 1.2.: Acompanhamento de programas de educação ambiental dos empreendimentos analisados pelos Comitês PCJ	2
Eixo Temático 2: Comunicação institucional dos Comitês PCJ e difusão de pesquisas e tecnologias em recursos hídricos	6
Programa 2.1.: Estruturação de comunicação ampliada sobre a atuação Comitês PCJ	3
Programa 2.2.: Integração e difusão de pesquisas e tecnologias ao enfrentamento dos desafios do Plano das Bacias PCJ	3
Eixo Temático 3: Capacitação técnica relacionada ao planejamento e com a gestão dos recursos hídricos	2
Programa 3.1.: Formação de atores sociais sobre a realidade socioambiental das Bacias PCJ e implementação das ações prioritárias do Plano das Bacias PCJ	2
Eixo Temático 4: Educação ambiental voltada à conservação dos recursos hídricos em áreas rurais e áreas protegidas	1
Programa 4.1.: Formação e divulgação de informações que favoreçam conservação e recuperação dos recursos hídricos na área rural nas Bacias PCJ	1
Gestão de Recursos Hídricos	35
Eixo Temático 1: Apoio Operacional e Suporte Técnico	13
Programa 1.1.: Apoio operacional para a Agência das Bacias PCJ	7
Programa 1.2.: Suporte Técnico e Logístico para os Comitês PCJ	6
Eixo Temático 2: Instrumentos de gestão	13
Programa 2.1.: Cobrança pelo uso dos recursos hídricos	1
Programa 2.2.: Sistemas de informações sobre recursos hídricos	1
Programa 2.3.: Monitoramento dos recursos hídricos superficiais	3
Programa 2.4.: Enquadramento, atualização e reenquadramento dos corpos d'água	4
Programa 2.5.: Outorga e fiscalização	3
Programa 2.6.: Planos de Recursos Hídricos	1
Eixo Temático 3: Articulação entre Comitês de Bacia	9
Programa 3.1.: Articulação e cooperação para a gestão integrada dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Tietê	7
Programa 3.2.: Cooperação entre a gestão dos recursos hídricos nas Bacias PCJ e na Bacia Hidrográfica dos Rios Sorocaba e Médio Tietê	2
Total	120

Fonte: Adaptado do Relatório Final do Plano de Recursos Hídricos das Bacias PCJ 2020-2035

Dentre as ações mencionadas, há uma definição de prioridades para a Gestão dos Recursos Hídricos nas Bacias PCJ (COMITÊS PCJ, 2020), realizada por meio de reuniões intercâmaras, envolvendo aspectos técnicos, a capacidade institucional da Agência das Bacias PCJ, a percepção dos integrantes dos CBH PCJ e da sociedade da bacia. Durante esse processo, foram identificados e hierarquizados os temas considerados estratégicos, levando em conta a interdependência de determinadas ações para sua execução combinada. O estudo desses temas prioritários visa o reconhecimento das áreas críticas, a proposição de intervenções e a determinação de temas prioritários alinhados com os Cadernos Temáticos.

No total, conforme o PBH PCJ 2020 a 2035 (COMITÊS PCJ, 2020), foram elencadas 120 ações, categorizadas de acordo com sua prioridade: 39 ações de Muito Alta Prioridade, 36 de Alta Prioridade, 24 de Média Prioridade, 10 de Baixa Prioridade e 11 de Muito Baixa Prioridade, correspondendo a 33%, 30%, 20%, 8% e 9% das ações, respectivamente, como é demonstrado no Quadro 3.

Quadro 3- Ações elegíveis e prioridade do PRH PCJ 2020 a 2035.

Temas Estratégicos e Ações	Prioridades
Enquadramento dos Corpos d'Água Superficiais	
1.1.1 - Elaboração de estudos para ampliação e melhoria dos sistemas de coleta de esgotos	Alta
1.1.2 - Elaboração de estudos para ampliação e melhoria dos sistemas de transporte de esgotos	Alta
1.1.3 - Elaboração de projetos para ampliação e melhoria dos sistemas de coleta de esgotos	Alta
1.1.4 - Elaboração de projetos para ampliação e melhoria dos sistemas de transporte de esgotos	Alta
1.1.5 - Ampliações e melhorias dos sistemas de coleta de esgotos	Alta
1.2.1 - Melhoria e recuperação da qualidade das águas	Alta
1.2.2 - Elaboração de estudos para a implantação de novas ETEs visando tratamento secundário	Muito Alta
1.2.3 - Elaboração de projetos para a implantação de novas ETEs visando tratamento secundário	Muito Alta
1.2.4 - Elaboração de estudos e relatórios visando o licenciamento das ETEs projetadas	Muito Alta
1.2.5 - Implantação das ETEs projetadas e melhorias das ETEs existentes	Muito Alta
2.1.1 - Elaboração de estudos de melhorias da eficiência das ETEs na remoção de nutrientes	Alta

2.1.2 - Elaboração de projetos de melhorias da eficiência das ETEs na remoção de nutrientes	Alta
2.1.3 - Elaboração de estudos de viabilidade de implantação de unidades de tratamento de rios (UTR)	Muito Baixa
2.1.4 - Elaboração de estudos sobre a remoção física de aguapés e a possibilidade de reutilização das plantas	Muito Baixa
2.1.5 - Cadastro, caracterização e modelagem de cargas industriais	Muito Alta
2.1.6 - Estudos de alternativas de diminuição da carga industrial	Alta
2.1.7 - Elaboração e revisão de planos municipais de saneamento básico	Média
2.1.8 - Implantação de Unidades de Tratamento de Lodo nas ETAs	Alta
2.1.9 - Implantação das melhorias das ETEs projetadas e retrofit de ETEs para remoção de nutrientes	Alta
2.2.1 - Elaboração de estudos sobre os impactos da cloração de efluentes nos mananciais	Média
2.2.2 - Elaboração de projetos de implantação de tecnologias de desinfecção de efluentes domésticos	Média
2.2.3 - Implantação das tecnologias de desinfecção projetadas	Alta
3.1.1 - Elaboração de estudo do background de fósforo nos corpos hídricos das Bacias PCJ e integração no SSD	Alta
3.1.2 - Elaboração de estudo piloto para avaliação da carga difusa de origem urbana e rural afluyente nos corpos hídricos das Bacias PCJ	Alta
3.1.3 - Elaboração de estudo sobre estruturas de controle e redução de cargas difusas e definição de metodologia para identificação e priorização de áreas potencialmente afetadas por cargas difusas de origem rural e urbana	Alta
3.2.1 - Elaboração de projetos demonstrativos para contenção de cargas difusas de origem rural e urbana	Média
3.2.2 - Elaboração de um Plano de Contenção de Cargas Difusas em locais prioritários nas Bacias PCJ	Alta
3.2.3 - Implantação de medidas de contenção de cargas difusas de origem rural e urbana em locais prioritários	Alta
4.1.2 - Ampliação e divulgação do programa de capacitação (Escola da Água e Saneamento), fomento e incentivo à capacitação de operadores	Muito Alta
Garantia de Suprimento Hídrico e Drenagem	
1.1.1 - Manutenção e aprimoramento de um modelo chuva-vazão para as Bacias PCJ	Muito Alta
1.2.1 - Aprimoramento de modelo de simulação hidrodinâmica do tempo de trânsito e do amortecimento da vazão preferencialmente à jusante do Sistema Cantareira	Média
1.2.2 - Estudo de regras de operação das PCHs para minimização do conflito com abastecimento	Muito Baixa
1.2.3 - Previsão de níveis para energia, navegação e abastecimento na Sala de Situação PCJ	Muito

	Baixa
2.1.1 - Elaboração do plano diretor de reúso de água para as Bacias PCJ	Média
2.2.1 - Desenvolvimento de estudos de alternativas e intervenções para minimização dos riscos de inundação ribeirinha	Média
2.3.1 - Acompanhamento e apoio aos estudos de viabilidade, projetos de engenharia e licenciamento ambiental das barragens de Pedreira, Duas Pontes e do ribeirão Piraí e do trecho Oeste do SAR	Média
2.4.1 - Desenvolvimento de estudo de alternativas de aumento da disponibilidade hídrica nas sub-bacias dos rios Atibaia, Jundiá e Capivari	Muito Alta
3.1.1 - Estudos de viabilidade para aumento de regularização de vazões em mananciais existentes e novos barramentos	Alta
3.1.2 - Estudos hidrogeológicos para exploração sustentável de águas subterrâneas	Baixa
3.2.1 - Elaboração e revisão de Planos de Controle e Redução de Perdas	Alta
3.2.2 - Controle de perdas em sistemas de abastecimento de água	Alta
3.2.3 - Manutenção do projeto de benchmarking para o controle de perdas de água em sistemas de distribuição	Muito Alta
3.2.4 - Diagnóstico da capacidade e compromisso dos municípios	Baixa
3.3.1 - Elaboração de um guia de manejo de drenagem e manejo de águas pluviais	Média
3.3.2 - Elaboração dos Planos Diretores de Drenagem Urbana e Manejo de Águas Pluviais	Alta
Conservação e Uso do Solo e da Água no Meio Rural e Recomposição Florestal	
1.1.1 - Desenvolvimento e monitoramento da implementação dos PIPs	Muito Alta
1.2.1 - Promoção da conservação e recuperação de nascentes, matas ciliares e áreas de recarga	Muito Alta
1.2.2 - Promoção do isolamento de fatores de degradação em matas ciliares e áreas de recarga	Muito Alta
1.2.3 - Incentivo à proteção das áreas sujeitas à restrição de uso	Média
1.2.4 - Fomento à elaboração de planos integrados de recomposição florestal e proteção dos biomas Mata Atlântica e Cerrado	Média
1.2.5 - Estabilização de voçorocas nas propriedades que receberão projetos de recomposição florestal (fonte: PDRF)	Média
1.2.6 - Aplicação de técnicas de conservação do solo em propriedades que receberão os projetos de recomposição florestal (fonte: PDRF)	Média
1.2.7 - Planejamento, realização de ações e eventos de educação ambiental relativas aos recursos hídricos em áreas protegidas.	Média
1.3.1 - Implementação de projetos de PSA	Muito Alta
2.1.1 - Execução de intervenções de conservação de solo	Alta

2.1.2 - Elaboração de um Plano de Contingência para intervenções nas microbacias de maior criticidade em casos de conflitos pelo uso da água durante períodos de escassez	Baixa
2.2.1 - Estudo para elaboração de proposta metodológica para zoneamento hidroagrícola	Baixa
2.2.2 - Elaboração do zoneamento Hidroagrícola das Bacias PCJ	Baixa
3.1.1 - Substituição de sistemas rudimentares de tratamento de esgoto (fossa negra) por sistemas mais eficientes	Alta
3.1.2 - Fomento a Planos Municipais de Saneamento Rural	Alta
3.1.3 - Adequação de instalações para disposição temporária para recolhimento de resíduos	Muito Baixa
Águas Subterrâneas	
1.1.1 - Criação de um repositório técnico científico com informações relativas às águas subterrâneas para as Bacias PCJ	Muito Baixa
1.1.2 - Desenvolvimento de banco de dados de poços e suporte à decisão	Alta
2.1.1 - Desenvolver estudo regional hidrogeológico nas Bacias PCJ	Média
2.1.2 - Desenvolvimento de estudo para estimativa de balanços hídricos e recargas nas Bacias PCJ	Média
2.1.3 - Delimitar as principais áreas de recarga e estabelecer diretrizes de proteção	Média
2.2.1 - Elaboração do estudo hidrogeológico do aquífero Tubarão	Média
2.3.1 - Desenvolver um plano de gestão integrada de águas subterrâneas a partir das ferramentas desenvolvidas	Muito Baixa
2.4.1 - Desenvolvimento de estudo conceitual e piloto sobre recarga artificial	Muito Baixa
3.1.1 - Estudos sobre alternativas de oferta hídrica em áreas com maior comprometimento das disponibilidades atuais	Muito Baixa
3.2.1 - Realizar os procedimentos estabelecidos para as áreas de restrição e controle já identificadas nas Bacias PCJ e avaliar a existência de novas áreas	Muito Alta
3.3.1 - Determinação da vulnerabilidade natural e risco de contaminação em escala municipal	Baixa
3.4.1 - Determinação dos perímetros de alerta de poços de abastecimento público	Baixa
Educação Ambiental, Integração e Difusão de Pesquisas e Tecnologias	
1.1.1 - Elaboração e execução de um Plano de Comunicação para o fortalecimento da comunicação entre a sociedade civil e os Comitês PCJ	Muito Alta
1.2.1 - Elaboração de diagnóstico da situação dos programas de educação ambiental dos empreendimentos analisados pelos Comitês PCJ	Baixa
1.2.2 - Elaboração de proposta de acompanhamento dos Programas de Educação Ambiental dos empreendimentos analisados pelos Comitês PCJ.	Muito Baixa
2.1.1 - Realização de processos formativos de comunicadores	Média
2.1.2 - Realização de processos formativos e campanhas educativas sobre a realidade das Bacias	Muito

PCJ	Alta
2.1.3 - Elaboração e divulgação de materiais educativos	Média
2.2.1 - Elaboração de propostas para órgãos de financiamento em pesquisas	Média
2.2.2 - Divulgação e facilitação de acesso à informação sobre pesquisas (em execução e concluídas) e inovações tecnológicas	Baixa
2.2.3 - Apoio ao desenvolvimento e difusão de pesquisas e tecnologias que contribuam no enfrentamento dos desafios identificados no Plano das Bacias PCJ	Alta
3.1.1 - Processos formativos de representantes dos poderes legislativo, executivo, judiciário e líderes comunitários sobre a realidade socioambiental das Bacias PCJ e as prioridades do Plano de Bacias	Muito Alta
3.1.2 - Elaboração de um Plano de Capacitação Técnica e realização de processos formativos nas áreas de atuação das Câmaras Técnicas	Muito Alta
4.1.1 - Construção de propostas para a recuperação, conservação e proteção dos recursos hídricos em áreas rurais	Muito Alta
Gestão de Recursos Hídricos	
1.1.1 - Apoio operacional para a Área de Tecnologia da Informação - TI	Muito Alta
1.1.2 - Apoio operacional para a Área de Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos	Muito Alta
1.1.3 - Apoio operacional para acompanhamento de projetos de assessoria ambiental	Muito Alta
1.1.4 - Apoio operacional para acompanhamento de empreendimentos de demanda espontânea	Muito Alta
1.1.5 - Apoio operacional para acompanhamento de projetos da área de Sistema de Informações	Muito Alta
1.1.6 - Apoio operacional para a área de comunicação social	Muito Alta
1.1.7 - Apoio Operacional para acompanhamento de ações da porção mineira	Muito Alta
1.2.1 - Apoio operacional para a Secretaria Executiva dos Comitês PCJ	Muito Alta
1.2.2 - Remuneração de agentes técnicos e financeiros para empreendimentos deliberados pelos Comitês PCJ	Muito Alta
1.2.3 - Logística de Suporte às reuniões Plenárias e das CTs dos Comitês PCJ	Muito Alta
1.2.4 - Participação de membros dos Comitês PCJ em eventos internos das CTs e eventos externos	Muito Alta
1.2.5 - Manutenção de licenciamento de sistemas de TI	Muito Alta
1.2.6 - Eventos especiais dos Comitês PCJ	Muito

	Alta
2.1.1 - Estudos para aprimoramento da Cobrança pelo uso dos recursos hídricos	Muito Alta
2.2.1 - Manutenção e aprimoramentos do SSD PCJ	Muito Alta
2.3.1 - Expansão, integração, operação e manutenção da rede de monitoramento quali-quantitativo dos recursos hídricos	Muito Alta
2.3.2 - Monitoramento de chuva, vazão, qualidade e nível de água subterrânea em pequenas bacias hidrográficas	Média
2.3.3 - Implantação, integração e manutenção da Rede de Monitoramento quali-quantitativo das águas subterrâneas	Muito Alta
2.4.1 - Encaminhamento do enquadramento da porção mineira das Bacias PCJ	Muito Alta
2.4.2 - Elaboração de estudos sobre enquadramento de reservatórios	Baixa
2.4.3 - Acompanhamento do alcance das metas de enquadramento e processos de reenquadramento	Alta
2.4.4 - Elaboração de estudo para enquadramento preliminar das águas subterrâneas nas Bacias PCJ	Muito Baixa
2.5.1 - Desenvolvimento de um plano de fiscalização de Outorgas em apoio ao órgão gestor	Média
2.5.2 - Apoio à regularização de outorga na área rural	Alta
2.5.3 - Apoio operacional para Fiscalização de Outorgas	Muito Alta
2.6.1 - Apoio operacional para gerenciamento da implementação e da revisão do Plano de Bacias	Muito Alta
3.1.1 - Discutir a possibilidade de implantação de agências de bacia	Alta
3.1.2 - Elaborar ações de comunicação social para a Bacia do Tietê	Alta
3.1.3 - Fomentar a adequação das redes de monitoramento	Alta
3.1.4 - Estabelecer parcerias para pesquisa com universidade e institutos	Alta
3.1.5 - Elaborar Plano de Comunicação quando de operações emergenciais das barragens	Alta
3.1.6 - Integrar dados de monitoramento quali-quantitativos	Alta
3.1.7 - Promover a compatibilidade entre os planos de cada UGRHI	Alta
3.2.1 - Estudo para articulação entre CBHs visando a pactuação de condições de entrega	Média
3.2.2 - Apoio à gestão administrativa da Fundação da Agência da Bacia Hidrográfica dos Rios Sorocaba e Médio Tietê	Alta

Fonte: Adaptado de Relatório Final do Plano de Recursos Hídricos das Bacias PCJ 2020-2035

Prates (2021) ressalta os desafios enfrentados pelo comitê PCJ são em relação aos levantamentos de dados informados pelos municípios, dificultando a gestão de recursos hídricos, particularmente na obtenção de informações precisas que possam orientar a tomada de decisões pelos gestores. A Agência de Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ), ao elaborar seu plano para 2010-2020, enfatizou a importância de monitorar e acompanhar as metas do Plano de Bacias como uma ferramenta essencial para identificar problemas que dificultam seu cumprimento. Contudo, a qualidade e a consistência dos dados fornecidos pelos municípios são obstáculos significativos nesse processo.

Nesse contexto, a implementação de um Sistema de Informação se torna fundamental para superar esses desafios, permitindo um acompanhamento mais eficaz das metas e ações do PBH. O uso de tal sistema facilita a organização, análise e integração dos dados, o que é crucial para o sucesso das estratégias de gestão e para a adaptação contínua das políticas públicas às realidades locais.

2.4.3. Sistemas de informações sobre recursos hídricos nas bacias PCJ

A Lei Federal nº 9.433/97 Seção VI (BRASIL, 1997), estabelece o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos como um sistema destinado à coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações relacionadas aos recursos hídricos e fatores envolvidos em sua gestão. Esta legislação enfatiza princípios fundamentais para o funcionamento deste sistema, como a descentralização da obtenção e produção de dados, a coordenação unificada e o acesso garantido à sociedade. Os objetivos do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) incluem reunir, dar consistência e divulgar dados sobre a situação dos recursos hídricos no Brasil, atualizar informações sobre disponibilidade e demanda desses recursos em todo o território nacional, e fornecer subsídios para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos.

Além do SNIRH, o PBH PCJ 2020 a 2035 (COMITÊS PCJ, 2020) também descreve os sistemas Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH), um sistema de informações a nível nacional composto pela autodeclaração dos usuários de recursos hídricos, abrangendo informações como finalidade do uso da água, vazões captadas e consumidas, lançamentos nos corpos d'água, entre outros.

Ademais, há outros sistemas, como o Portal de Metadados da ANA, que permite acesso a dados geoespaciais da ANA e do SNIRH, e o Atlas Geográfico Digital de Recursos Hídricos do Brasil. A página virtual do SNIRH proporciona acesso temático organizado em

doze temas, cada um em um ícone individual, incluindo informações sobre divisão hidrográfica, quantidade e qualidade de água, usos da água, balanço hídrico, eventos hidrológicos críticos, institucional, planejamento, regulação e fiscalização, e programas. Ademais, de acordo com o Portal ANA, são apresentadas interfaces de acesso a outros sistemas, como o Sistema Visualizador de Informações Hidrológicas do HidroWeb e o Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR), onde é possível verificar a situação de diversos reservatórios, como os do Sistema Cantareira. O acesso aos metadados é realizado pelo portal da ANA, permitindo extrair informações e dados como mapas, qualidade e quantidade de água e divisões hidrográficas.

Segundo o Portal ANA, o Portal HidroWeb, integrante essencial do SNIRH, oferece acesso a um banco de dados da RHN, contendo informações cruciais como níveis fluviais, vazões, chuvas e qualidade da água. Essa plataforma desempenha papel fundamental na gestão dos recursos hídricos e setores econômicos diversos, pois contribui para o planejamento e manutenção de infraestrutura hidráulica e permite monitorar eventos hidrológicos críticos, fornecendo dados em tempo real e facilitando a simulação e previsão de impactos nas bacias hidrográficas. Adicionalmente, disponibiliza informações do Programa Qualiágua, que monitora a qualidade da água. Entretanto, os dados disponíveis no Portal HidroWeb se referem à coleta convencional de dados hidro meteorológicos, ou seja, registros diários feitos pelos observadores e medições feitas em campo pelos técnicos em hidrologia e engenheiros hidrólogos de maneira manual.

A gestão dos recursos hídricos nas Bacias Hidrográficas PCJ contam com o Sistema de Suporte à Decisão (SSD PCJ), fruto da colaboração entre a Agência das Bacias PCJ e o Laboratório de Sistema de Apoio a Decisão da Escola Politécnica da USP (LABSID) para apoiar os CBH PCJ, a Agência das Bacias PCJ e os órgãos gestores na gestão e no planejamento dos recursos hídricos da região, conforme descrito no Portal SSD de Bacias PCJ. De acordo com Manual do Sistema Acquanet (2013) fornecido pelo LABSID, SSD PCJ é um sistema estruturado com base em redes de fluxo do tipo AcquaNet, que permite a monitorização da disponibilidade e qualidade dos principais corpos d'água superficiais das Bacias PCJ. Por meio de modelos matemáticos integrados a uma base de dados, o SSD PCJ possibilita a simulação e avaliação de diversos cenários de uso dos recursos hídricos, considerando os diversos usos presentes nas bacias, como estações de tratamento de água e esgoto, demandas pontuais e reservatórios.

O SSD PCJ apresenta uma interface virtual com dados telemétricos de vazão, precipitação e níveis dos rios provenientes de fontes como o Sistema de Alerta a Inundações

de São Paulo (SAISP), o Centro Integrado de Informações agro meteorológicas (CIIAGRO) e da ANA, além de indicar a situação de alerta nos pontos monitorados.

A interface de modelagem do SSD PCJ é projetada para realizar simulações de cenários utilizando dados municipais, de Estação de Tratamento de Água (ETA), Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), demandas, reservatórios, transposições e uso do solo. Com a aplicação do AcquaNet fornecido pelo LABSID, é possível simular as interferências existentes ou projetadas na bacia, com modelos matemáticos para representar a qualidade da água. Os parâmetros simuláveis incluem Demanda Bioquímica de Oxigênio, Oxigênio Dissolvido, Coliformes, Nitrogênio e Fósforo e os resultados das simulações são apresentados na própria interface, permitindo visualização em mapa e análise por trechos de rios, demanda de setores, estações de tratamento de água e esgoto, reservatórios, transposições e municípios, sendo disponibilizados de forma unificada e com suporte de ferramentas de BI e SIG.

Estes sistemas de Suporte a Decisões das Bacias apresentam algumas informações úteis para o levantamento dos resultados das ações propostas pelo PBH, mas não são capazes de auxiliar na avaliação de metas que devem ser monitoradas, seus resultados principais e a implementação das ações do PBH PCJ.

Através dos levantamentos das informações úteis provenientes do SSD ou realizados de maneira convencional, são elaborados relatórios de acompanhamento para a divulgação da situação da bacia hidrográfica. A ação de divulgação visa difundir informações sobre o plano, envolvendo todas as esferas do Planejamento de Recursos Hídricos, e garantir que o conhecimento relacionado e o acompanhamento das ações sejam acessíveis à população. A disponibilização e difusão dos resultados do planejamento, juntamente com o acompanhamento das ações, são realizadas por meio de recursos de comunicação ágeis, flexíveis e acessíveis ao público pela internet. Os CBH PCJ, com apoio da Agência das Bacias PCJ, são responsáveis por essa comunicação, seguindo um roteiro associado à sistemática de monitoramento e acompanhamento do Plano (COMITÊS PCJ, 2020).

Nota-se no Quadro 4 que os Relatórios com seus respectivos resultados possuem diferentes atores responsáveis pela divulgação, com seus métodos particulares para o levantamento das informações, o que pode dificultar no alinhamento, veracidade e a atualização destas informações, por não apresentar um padrão.

Quadro 4 - Comunicação dos resultados do PBH e acompanhamento pelos atores responsáveis.

Canal / Instrumento	Público-alvo	Periodicidade	Mecanismo
Relatório de Situação	Atores estratégicos do SigRH (SP)	Anual	Inserção de informações sobre os programas e ações do Plano, com seus indicadores e metas.
Relatório de Gestão	Atores estratégicos e gestores municipais	Anual	Inserção de informações sobre a implementação das Ações e o alcance das metas do Plano.
Edição simplificada dos Relatórios de Situação e Gestão	Sociedade da bacia (em geral)	Anual	Resumo das informações sobre a implementação do Plano de Bacias.
Edição digital (eletrônica) dos documentos	Sociedade da bacia (em geral)	Anual	Disponibilizado nos sites dos Comitês PCJ e Agência das Bacias PCJ.
Redes Sociais (facebook)	Sociedade da bacia (em geral)	Cotidiano	Chamadas para os documentos nas redes sociais do Comitê e Agência
Mailing list	Atores Estratégicos	Ad hoc	Disponibilização do material para os contatos cadastrados, principalmente as prefeituras dos municípios integrantes das Bacias PCJ
Envio de ofícios	Prefeituras	Ad hoc	Envio formal às prefeituras, via correio, com ofício do comitê, destacando os compromissos

Fonte: Adaptado de Relatório Final do Plano de Recursos Hídricos das Bacias PCJ 2020-2035

De acordo com o Quadro 4, dentre os relatórios está o Relatório de Situação, um instrumento de gestão que objetiva monitorar a quantidade e o balanço entre demanda e disponibilidade dos recursos hídricos, e avaliar a eficácia das ações e dos investimentos previstos no PRH para a recuperação da qualidade e a garantia da oferta de água nas bacias (COMITÊS PCJ, 2020).

De acordo com o PBH PCJ 2020 a 2035, dentre os indicadores e ações existentes, está a avaliação atual da qualidade da água e a projeção de cenários futuros envolveram a análise de sete parâmetros: oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio (amoniaco, nitrito e nitrato), fósforo total e coliformes termotolerantes. Os resultados demonstraram a necessidade de um esforço considerável para alinhar a situação presente com as metas de qualidade da água estabelecidas pelo Enquadramento dos Corpos d'Água, especialmente no que diz respeito aos nutrientes e coliformes (COMITÊS PCJ, 2020).

Porém, o PBH PCJ 2020 a 2035 (COMITÊS PCJ, 2020) aponta que, dada a diversidade de atividades nas Bacias PCJ, notadamente a indústria e a irrigação, outros

parâmetros devem ser considerados para compreender melhor seus impactos na qualidade dos corpos d'água. Além dos parâmetros já investigados, é crucial monitorar, quando viável, outros indicadores da qualidade da água, como a presença de agrotóxicos, clorofila A e feofitina B em reservatórios para detectar a presença de algas, e metais prejudiciais à saúde humana, fauna e flora, como cromo e cádmio, que são introduzidos nos corpos d'água principalmente por efluentes industriais e fertilizantes. Além disso, a avaliação da presença de compostos organoclorados, formados devido à presença de cloro residual nos mananciais, é fundamental para compreender melhor a qualidade da água nas Bacias PCJ.

Com relação ao Tema Estratégico de Águas Subterrâneas, é abordada a necessidade do apoio à expansão do cadastramento, controle e fiscalização das captações e outorgas de uso da água subterrânea, o estímulo a ajustes nos Planos Diretores municipais para harmonizar o zoneamento urbano com a preservação de aquíferos essenciais para o abastecimento público, e o suporte à implementação e aprimoramento da rede de monitoramento de águas subterrâneas. Já no contexto do Tema Estratégico de Garantia de Suprimento Hídrico e Drenagem, além das diretrizes mencionadas, são propostas a promoção do aprimoramento de ferramentas para reduzir incertezas nas estimativas de disponibilidade hídrica e melhorar o balanço hídrico, o acompanhamento contínuo e aperfeiçoamento das regras operacionais entre os órgãos gestores e agentes do setor elétrico para a operação de unidades geradoras hidrelétricas nas Bacias PCJ, a realização de discussões sobre estudos e projetos de reservatórios, sistemas adutores e transposições, e o estímulo ao uso de ferramentas de suporte à decisão para a operação de sistemas de regularização e adução de vazões, considerando previsões meteorológicas e de vazões em cursos d'água, bem como transposições entre bacias (COMITÊS PCJ, 2020).

De acordo com Relatório de Acompanhamento da Implementação do PBH PCJ 2020 a 2035 (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2020), o PBH PCJ aprovado em 2020 delineia os objetivos, prazos, responsáveis e fontes de financiamento de suas ações, mas carece de indicadores intermediários e datas intermediárias entre os prazos iniciais e finais. O desafio de estimar metas e prazos intermediários, especialmente para as ações "em execução", foi abordado durante a elaboração deste relatório, envolvendo discussões no GT Implementação da CT-PB com contribuições da ANA. Este debate é crucial para futuras avaliações, revisão de metas e prazos intermediários, assim como para a próxima revisão do PBH PCJ. O uso do "Manual para avaliação da Implementação de Planos de Recursos Hídricos" permitiu uma avaliação complementar das ações do PBH, embora este relatório seja apenas um esforço

inicial e pretenda-se aprimorar a gestão da implementação, especialmente na visualização dos resultados.

Em relação às metas intermediárias no setor de saneamento, o desafio foi a obtenção de dados mais recentes, especialmente em relação a Minas Gerais, e a dificuldade em obter dados sobre eficiência para remoção de Fósforo e Nitrogênio. De acordo com o Relatório de Acompanhamento da Implementação do PBH PCJ 2020 a 2035 (AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ, 2020) recomenda-se visitas aos municípios e a aplicação de questionários para aprofundar o levantamento das dificuldades em atender as metas previstas pelo PBH PCJ 2020 a 2035. Também é recomendada a avaliação contínua dos índices de saneamento frente às metas estabelecidas pelo PBH PCJ 2020 a 2035, a fim de garantir o acompanhamento e a correção de eventuais desvios.

Nota-se que a frequência com que os relatórios gerados e disponibilizados são baixa, sendo apenas anual, e apresenta dificuldades em obter todos os dados para avaliar o cumprimento do PBH PCJ 2020 a 2035, além de depender de levantamentos de dados proveniente dos municípios o que torna o processo trabalhoso. Portanto, conforme é descrito no PBH PCJ 2020 a 2035, há a necessidade de aprimorar o monitoramento dos recursos hídricos, incluindo águas subterrâneas, bem como outros indicadores da qualidade da água para garantir mais precisão e controle no processo de tomada de decisão e auxiliar na avaliação do PBH PCJ 2020 a 2035 de forma automatizada.

3. Metodologia da pesquisa

3.1. Delineamento da Pesquisa

A pesquisa se caracteriza como básica, conforme delineada por Nascimento e Sousa (2016), pois apresenta objetivo primordial a geração de conhecimento inédito para o avanço da ciência, almejando estabelecer verdades, ainda que temporárias e relativas, de interesse universal e não localizado. Destaca-se que esta modalidade de pesquisa não está vinculada ao compromisso imediato de aplicação prática de seus resultados. Tal perspectiva, conforme Gil (1999), ressalta a busca do pesquisador pela produção de novos conhecimentos, em que a meta principal é a aquisição de conhecimento.

O estudo em questão assume a característica de pesquisa exploratória, em virtude da escassa exploração do tema escolhido, como evidenciado por Gil (2008, p. 43). Esta abordagem proporciona uma familiarização mais profunda com o tema, contribuindo para sua disseminação e compreensão mais abrangente. Além disso, a pesquisa exploratória permite

uma compreensão mais completa e adequada da realidade, como descrito por Piovesan e Temporini (1995), oferecendo uma visão da face oculta da realidade, até então desconhecida, correspondente ao Universo de Respostas não explorado.

O estudo em análise adota uma abordagem qualitativa, conforme descrito por Gerhardt e Silveira (2009), caracterizada pela busca pela compreensão, descrição e explicação do fenômeno em questão, culminando na proposição de um Sistema de Apoio à Decisão destinado a monitorar o PBH PCJ. Esta perspectiva, conforme Minayo (2014), enfatiza a preocupação da pesquisa qualitativa com aspectos da realidade que não podem ser quantificados, priorizando a exploração do universo de significados, motivações, aspirações, crenças, valores e atitudes subjacentes ao fenômeno estudado.

3.2. Protocolo para coleta de dados

Para a coleta de informações úteis foi realizada uma pesquisa bibliográfica utilizando como base livros, documentos e publicações científicas através dos portais Google acadêmico, Periódicos da CAPES, Scielo.

A coleta de dados do referencial teórico foi distribuída em 4 temas principais:

- Bacias Hidrográficas e gestão dos recursos hídricos;
- Indicadores;
- Tecnologias da Informação e Comunicação;
- Plano de Bacias Hidrográficas

Para o tema de Bacias Hidrográficas e gestão dos recursos hídricos foram pesquisados os conceitos e definições de bacias hidrográficas, o ciclo hidrológico natural, conceitos e definições de gestão dos recursos hídricos e o histórico no Brasil. O Quadro 5 apresenta o conjunto de palavras chaves utilizadas para as buscas de cada tópico deste tema.

Quadro 5 - Combinação de palavras para busca de estudos relacionados a Bacias Hidrográficas e gestão dos recursos hídricos

Tópicos	Combinação de palavras
Conceitos e definições de bacias hidrográficas	“Bacias hidrográficas”, “Definição de bacias hidrográficas”, “Morfologia Bacias Hidrográficas”.
Ciclo hidrológico	“Ciclo hidrológico”, “Ciclo da água”, “ciclo de vida da água”.

Conceitos e definições de gestão de recursos	“Gestão de recursos hídricos”, “Gestão da água”, “Gestão de recursos hídricos no Brasil”.
histórico de gestão de recursos no Brasil	“instrumentos de gestão recursos hídricos”, “história dos recursos hídricos no Brasil”, “Segurança hídrica”.

Fonte: autor do trabalho

Para o tema Indicadores, procurou-se elencar os principais conceitos e as definições de um indicador, a importância de um indicador, indicadores de sustentabilidade e indicadores de recursos hídricos. O Quadro 6 busca representar a combinação de palavras utilizadas para as buscas de estudos para cada tópico deste tema.

Quadro 6 - Combinação de palavras para busca de estudos relacionados a Indicadores

Tópicos	Combinação de palavras
Conceitos e definições	“definição de indicador”, “elaboração de um indicador”.
Importância de um indicador	“importância de um indicador”, “relevância de um indicador”, “indicadores em Sistemas de Apoio à Decisão”.
Indicadores de sustentabilidade	“Indicador de sustentabilidade”, “indicador recurso natural”.
Indicadores para a gestão de recursos hídricos	“Indicador”, “Indicadores de gestão de recursos hídricos”.

Fonte: autor do trabalho

No tema Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC) a busca do referencial teórico foi realizada consistiu na descrição de conceitos e definições, seguindo para a definição de Sistemas de Informações e Sistemas de Apoio à Decisão apresentando as principais características e por fim o levantamento de tecnologias inovadoras presentes na literatura científica. O Quadro 7 busca representar a combinação de palavras utilizadas para a pesquisa bibliográfica.

Quadro 7 - Combinação de palavras para busca de estudos relacionados à TIC

Tópicos	Combinação de palavras
Conceitos e definições	“Tecnologia da Informação e comunicação”, “TIC na gestão de recursos hídricos”, “TIC”, “TIC e SAD”, “TIC e SI”.
Sistemas de Informação	“Sistemas de Informação”, “SI na gestão de recursos hídricos”, “Categorias de SI”, “definição de Sistemas de informação”.
Sistemas de Apoio à Decisão	“SAD”, “SAD gestão de recursos hídricos”, “definição de Sistema de Apoio à decisão”.
Tecnologias Inovadoras	“IoT”, “IoT gestão dos recursos hídricos”, “Rede de sensores”, “Big Data”, “Big Data na gestão de recursos hídricos”, “IA definição e aplicação”, “Blockchain definição e aplicação”, “Realidade Virtual”, “Realidade Aumentada”, “Machine learning”, Deep learning”.
Big Data	“Big Data”, “Big Data na gestão de recursos hídricos”, “Análise de dados com Big Data”.

Fonte: autor do trabalho

Para o tema Plano de Bacias Hidrográficas (PBH) foram buscados na literatura os conceitos e legislação que englobam o PBH, a descrição do PBH PCJ e o levantamento de Sistemas de Informação das bacias PCJ. O Quadro 8 demonstra o conjunto de palavras utilizadas para a busca dos respectivos temas.

Quadro 8 - Combinação de palavras para busca de estudos relacionados à TIC

Tópicos	Combinação de palavras
Conceitos e legislação	“Política Nacional De Recursos Hídricos”, “definição de plano de bacias hidrográfica”, “elaboração de um plano de bacia hidrográfica”.
PBH PCJ	“PBH PCJ”, “elaboração do PBH PCJ”, “Relatório PBH PCJ”.

Sistemas de Informação PCJ	“SSD PCJ”, “Sistemas de informação PBH PCJ”.
----------------------------	--

Para a proposta de um SAD para monitorar as ações estabelecidas pelo PBH PCJ foi aplicada a metodologia descrita posteriormente.

3.3. Desenvolvimento da pesquisa

No tema de Bacias Hidrográficas e gestão dos recursos hídricos foram abordados os conceitos e definições, e as principais características, uma vez que o espaço territorial de uma bacia hidrográfica está diretamente ligado com a gestão dos recursos hídricos, por ser a unidade de medida adotada. A pesquisa destes temas incluiu o ciclo hidrológico natural como fator importante na gestão, além da disponibilidade hídrica, a história da elaboração da Política Nacional de Recursos Hídricos e a importância da gestão dos recursos hídricos com base em indicadores.

Para o tema de Indicadores foi realizada a busca dos conceitos e definições, a elaboração de um indicador, a importância de indicadores no processo de tomada de decisão, seguido a descrição de indicadores de sustentabilidade e indicadores para a gestão de recursos hídricos.

No tema de Tecnologias da Informação e Comunicação foram abordados os principais conceitos e definições, acrescentado as definições e principais características de Sistemas de Informação (SI) e Sistema de Apoio à Decisão (SAD) determinando que podem auxiliar na gestão de recursos hídricos e no monitoramento de bacias hidrográficas associados a tecnologias emergentes, dentre eles IoT, Big Data, Blockchain, IA, Realidade Virtual e Realidade Aumentada, descritas no decorrer do capítulo.

Por fim, para o tema Plano de Bacias Hidrográficas foram realizadas buscas a respeito das definições de um PBH, a legislação que estabeleceu instrumentos de gestão que incluem o PBH. é então descrito o processo de elaboração do PBH PCJ, trazendo informações sobre as metas e ações divididas por eixos e temas, e categorizadas por ordem de prioridade. Ao final da discussão deste tema são relatados os Sistemas de Informação das bacias hidrográficas PCJ que auxiliam na captura de dados para a reavaliação anual do PBH PCJ.

No referencial teórico foram criados 4 principais quadros que foram usados de apoio para a proposta de um SAD que possa auxiliar no monitoramento da situação das bacias

hidrográficas e avaliação da efetividade de metas e ações do PBH PCJ. Os Quadros criados no referencial teórico foram os seguintes:

- ✓ Quadro 1 – Elementos básicos de SAD com técnica de RBC;
- ✓ Quadro 2 – Plano de Ações em Tema Estratégico, Eixos e Programas e número de ações do PRH PCJ 2020 a 2035.
- ✓ Quadro 3 – Ações elegíveis e prioridade do PRH PCJ 2020 a 2035.
- ✓ Quadro 4 – Comunicação dos resultados do PBH e acompanhamento pelos atores responsáveis.

Para elaborar a proposta do SAD apresentado na Figura 1, foi adotada uma abordagem metodológica baseada na análise de requisitos funcionais e técnicos, levando em consideração tanto as demandas específicas das agências de gestão de bacias hidrográficas com relação ao levantamento de informações quanto às particularidades das metas e objetivos estabelecidos no Plano de Bacias 2020-2035.

Inicialmente, realizou-se um levantamento bibliográfico de tecnologias atualmente empregadas na coleta e monitoramento de dados, e definiu-se uma arquitetura de processamento e análise de dados que integra técnicas de Big Data e Inteligência Artificial para permitir a análise em tempo real e preditiva dos dados coletados. A estruturação do sistema foi orientada por um modelo conceitual que considerou, além dos dados ambientais relacionados à quantidade e qualidade da água, os inputs referentes às ações e metas do plano, facilitando a comparação com os resultados alcançados.

A partir desse modelo, foram elaboradas as bases para o desenvolvimento de *dashboards* interativos, que consolidam visualmente os diagnósticos gerados e promovem uma análise acessível para gestores e tomadores de decisão.

Finalmente, tecnologias de Realidade Virtual e Realidade Aumentada foram integradas ao SAD como uma extensão para facilitar a visualização espacial dos dados em campo, proporcionando uma interface de uso intuitiva para inspecionar o estado das ações e o cumprimento das metas estabelecidas, conforme representado na Figura 1.

A metodologia para avaliação da eficácia das ações do PBH adota um SAD que integra coleta, processamento e visualização de indicadores essenciais para a gestão dos

recursos hídricos. A seleção das ações de "Melhoria e recuperação da qualidade das águas" e "Avaliação de áreas de restrição e controle" fundamenta-se na monitorização de parâmetros de qualidade da água, que podem ser capturados em tempo real por sensores IoT instalados ao longo dos corpos d'água. Com a análise de indicadores de qualidade da água é possível monitorar duas ações distintas estabelecidas no PBH

Com base no levantamento bibliográfico ao decorrer deste estudo, foi desenvolvida uma proposta teórica de SAD utilizando tecnologias inovadoras, como IoT, Big Data, IA, Blockchain, Realidade Virtual e Aumentada, demonstrando como essas ferramentas contribuem para o monitoramento das ações do PBH. O Índice de Qualidade da Água (IQA) é central para essa avaliação, sendo calculado com base em parâmetros ambientais, como concentração de contaminantes, e comparado com dados históricos para identificar melhorias ou deteriorações nas condições da água.

4. Proposta de SAD aplicado a Plano de bacias hidrográficas

Diante dos desafios relacionados à gestão de recursos hídricos, foi desenvolvido um modelo de SAD com base em uma ampla revisão bibliográfica. O objetivo principal deste modelo é monitorar a eficácia e a real implementação das ações e projetos propostos pelos Planos de Bacias Hidrográficas. Ao fornecer subsídios para a análise dessas iniciativas, o SAD visa apoiar os gestores na tomada de decisões estratégicas voltadas à segurança hídrica no âmbito de uma bacia hidrográfica, promovendo uma gestão mais eficiente e integrada dos recursos disponíveis e determinando a efetividade dos projetos e ações propostas do PBH.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma proposta de SAD que possibilite o monitoramento das ações dos PBH por meio do cálculo e análise de indicadores, com o suporte das TIC. Esse modelo conceitual pode ser adotado por gestores de comitês de bacias hidrográficas ou por qualquer entidade responsável pela gestão de recursos hídricos que reconheça a relevância de sua aplicação para apoiar o processo decisório. Para tanto, é necessário que o modelo seja implementado, constituindo-se, assim, em um Sistema de Informação automatizado e eficiente.

Na sequência, será apresentada a proposta do Sistema de Apoio à Decisão (Figura 1), detalhando sua aplicabilidade integrada às ações estabelecidas no Plano de Bacias Hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH PCJ) 2020-2035.

A partir das metas “Enquadramento dos Corpos d’Água Superficiais: 1.2.1 “Melhoria e recuperação da qualidade das águas” e “Águas Subterrâneas: 3.2.1 - Realizar os procedimentos estabelecidos para as áreas de restrição e controle já identificadas nas Bacias PCJ e avaliar a existência de novas áreas” (COMITÊS PCJ, 2020) é demonstrado como o sistema pode atuar no monitoramento e na análise contínua dos recursos hídricos, auxiliando na identificação de parâmetros críticos, na geração de diagnósticos robustos e na avaliação dos resultados das intervenções implementadas.

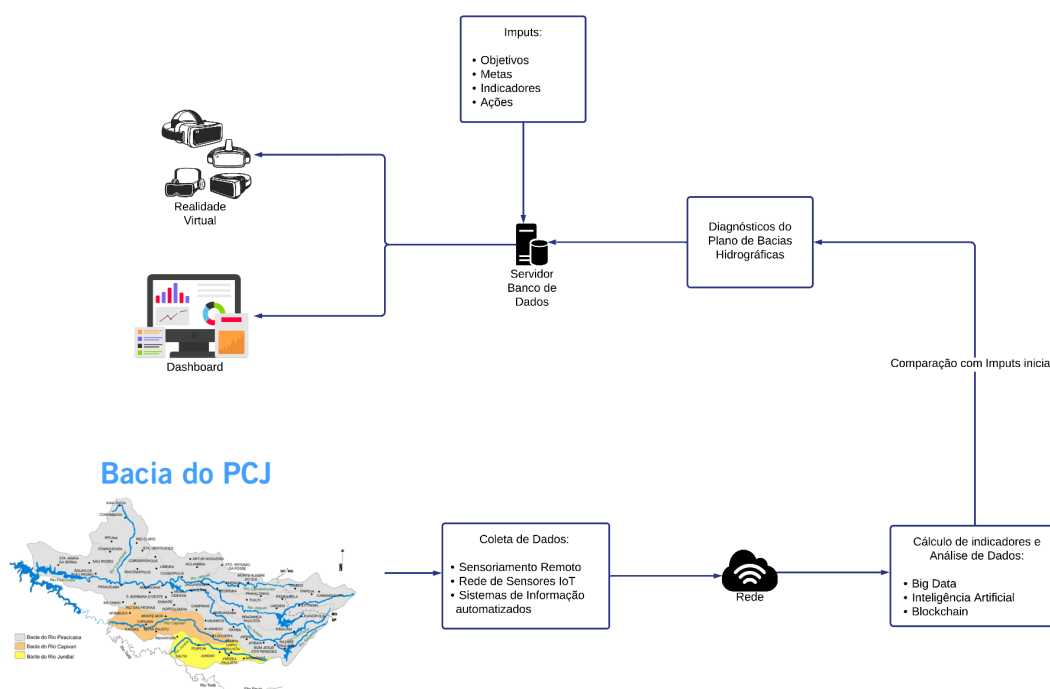
4.1. Proposta do Sistema de Apoio à Decisão

O modelo conceitual de SAD é fundamentado em processos de coleta, processamento e visualização de dados para a avaliação contínua da eficácia das ações delineadas no Plano de Bacias Hidrográficas, de acordo com o levantamento de informações realizado ao longo da fundamentação teórica. O sistema consolida informações coletadas por sistemas automatizados já utilizados pela agência de bacias, como o Sistema de Suporte a Decisões das

Bacias PCJ, bem como dados captados por sensores IoT, que monitoram parâmetros ambientais relevantes como a qualidade e disponibilidade de água. Esses dados, transmitidos por redes de comunicação, são encaminhados a um servidor central onde são armazenados e processados com o suporte de tecnologias de Big Data e IA. Em uma etapa subsequente, essas informações são comparadas aos dados de entrada referentes às ações, metas e prazos estabelecidos, permitindo gerar diagnósticos que avaliam se as ações executadas contribuem efetivamente para o cumprimento do plano. Esses diagnósticos, conforme demonstrado na Figura 1, são exibidos por meio de *dashboards* interativos, proporcionando uma visão consolidada e dinâmica do desempenho do plano, enquanto a utilização de tecnologias de Realidade Virtual e Realidade Aumentada amplia as possibilidades de análise e tomada de decisão.

A Figura 1, portanto, representa as etapas e elementos principais que compõem o modelo conceitual de SAD, sendo eles a coleta de dados, o cálculo de indicadores, a geração de diagnósticos do Plano de Bacias Hidrográficas e a projeção dos resultados através de *dashboards*

Figura 1 – Modelo Conceitual de Sistema de Apoio à Decisão para monitoramento de Plano de Bacias Hidrográficas



Fonte: autor do trabalho

4.1.1. Coleta de dados

Na proposta do SAD para a gestão de recursos hídricos em bacias hidrográficas, a coleta de dados é o elemento central, integrando múltiplas possibilidades de aplicação de tecnologias para fornecer informações precisas e em tempo real. Esse processo pode ser realizado por meio de diferentes abordagens tecnológicas, como o sensoriamento remoto via satélite, redes de sensores IoT e a utilização de sistemas de informação automatizados já existentes. A combinação dessas abordagens permite o monitoramento eficiente de variáveis ambientais, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas e fundamentadas, essenciais para o planejamento e gestão dos recursos hídricos.

O sensoriamento remoto por satélites é uma tecnologia avançada para o monitoramento em larga escala de bacias hidrográficas, permitindo a coleta de dados quantitativos e qualitativos sobre o estado ambiental em diferentes escalas global, regional e local, conforme descrito por Mascarenhas et al. (2009). Satélites de monitoramento terrestre-ambiental são amplamente empregados para avaliar o nível de degradação ambiental, com aplicações que abrangem o acompanhamento de biomas ameaçados, variações climáticas, níveis de poluição em corpos d'água e na atmosfera, entre outras medidas

essenciais. Especificamente para os recursos hídricos, o sensoriamento remoto oferece um suporte crucial para monitorar a qualidade da água e processos hidrológicos relevantes, como o fluxo de águas superficiais, além de processos erosivos e previsões de inundações nas bacias hidrográficas, proporcionando uma visão detalhada do estado de conservação hídrica e de possíveis impactos ambientais (MASCARENHAS et al., 2009).

Satélites como Landsat e Sentinel, conforme descrevem Pompêo e Moschini-Carlos (2022) equipados com sensores multiespectrais, são capazes de monitorar parâmetros como o uso do solo, a evapotranspiração, a qualidade da água e o fluxo de rios, o que possibilita uma análise contínua das condições ambientais e hidrológicas da bacia, fornecendo uma visão abrangente de todo o território. Tal abrangência é crucial para a detecção precoce de mudanças no ambiente, bem como para a avaliação da eficácia das ações implementadas pelos gestores a partir do Plano de Bacias Hidrográficas.

O sensoriamento remoto, aliado a redes de sensores IoT distribuídas em pontos estratégicos de bacias hidrográficas, como margens de rios e reservatórios, possibilita um monitoramento ambiental preciso e em tempo real de variáveis como nível da água, qualidade, pressão e temperatura.

De acordo com Sagne e Pandhare (2024), a implantação da tecnologia 5G, que utiliza tanto bandas de frequência de 4G quanto faixas de ondas milimétricas específicas, é fundamental para o desenvolvimento do IoT, permitindo maior taxa de dados para dispositivos inteligentes. Esses dispositivos demandam antenas compactas, eficientes e de baixo consumo energético, com alta conectividade e capacidade de integração, garantindo uma comunicação robusta e de alta performance, essencial para o monitoramento detalhado e gestão sustentável dos recursos hídricos. A rede 5G, com sua alta largura de banda e baixa latência, possibilita a coleta contínua de dados e sua rápida transmissão, mesmo em áreas remotas e de difícil acesso, ampliando a granularidade e precisão das informações monitoradas (SAGNE E PANDHARE, 2024).

No contexto de um sistema com base em uma rede de sensores IoT aplicada ao monitoramento de uma bacia hidrográfica, a arquitetura pode ser descrita em múltiplos níveis, cada um responsável por aspectos essenciais da coleta, transmissão, processamento e visualização de dados. O nível físico é o primeiro componente dessa arquitetura e corresponde à própria bacia hidrográfica, composta pelos corpos d'água que estão sendo monitorados, como rios, lagos e reservatórios.

No nível de sensores, são utilizados dispositivos sem fio responsáveis pela medição de variáveis físico-químicas essenciais para o monitoramento da água, tais como temperatura,

pH, oxigênio dissolvido, turbidez, e condutividade elétrica. De acordo com Sosa et al. (2024), esses sensores IoT possuem baterias internas de longa duração, otimizadas para eficiência energética e para minimizar a necessidade de manutenção frequente. A tecnologia utilizada oferece vantagens como longo alcance, baixo consumo de energia, cobertura ampla em ambientes internos e externos, escalabilidade e baixo custo de implementação, além de operar em frequências não licenciadas e compatíveis com padrões abertos. Essa compatibilidade é essencial no contexto do IoT, pois permite a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes, favorecendo a expansão e adoção da tecnologia e a criação de ecossistemas mais amplos e diversificados, como é o caso de bacias hidrográficas.

A transmissão dos dados ocorre através de diferentes tecnologias de comunicação, formando o nível de comunicação da arquitetura. Entre as principais tecnologias utilizadas estão as redes 4G, 5G e LoRaWAN, cada uma com características distintas. A tecnologia 4G oferece cobertura ampla e velocidades de internet que atendem a diversas aplicações, alcançando até 100 Mbps para download e 50 Mbps para upload, de acordo com a ANATEL (2013). Apesar de o consumo energético ser relativamente elevado, o 4G se destaca pela maior abrangência em áreas remotas, o que possibilita o acesso a uma navegação mais fluida para um número maior de usuários, principalmente quando comparado ao 3G, conforme descrito por Miranda (2023).

Por outro lado, a tecnologia 5G apresenta avanços significativos em velocidade e capacidade de resposta. Segundo a Perdomo et al.(2020), o 5G pode atingir até 20 Gbps, oferecendo latência reduzida, ideal para transmissões em tempo real de grandes volumes de dados. Além disso, o 5G permite a conexão de até um milhão de dispositivos por quilômetro quadrado, uma característica que o torna especialmente adequado para redes de dispositivos inteligentes, como carros autônomos, que demandam conexão constante e de baixa latência.

Por fim, a tecnologia LoRaWAN, Segundo Sagne e Pandhare (2024), destaca-se entre as soluções de conectividade para a IoT devido à sua capacidade de transmissão de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia e custos reduzidos. Isso a torna ideal para redes massivas de IoT, onde a principal demanda é a transmissão eficiente de pequenas quantidades de dados por dispositivos distribuídos em larga escala.

A LoRaWAN utiliza uma modulação que resiste a interferências e ruídos, viabilizando o uso de dispositivos com circuitos de baixo custo e com uma durabilidade estendida das baterias. Essas características beneficiam especialmente aplicações de monitoramento remoto e redes de sensores sem fio, possibilitando o desenvolvimento de sistemas IoT mais adaptáveis e escaláveis em ambientes onde o acesso a fontes de energia é limitado, como é o

caso de uma área de bacia hidrográfica em que transmitem pequenas quantidades de dados em intervalos maiores (SAGNE E PANDHARE, 2024).

O próximo componente da arquitetura é o nível de rede, onde ocorre o processamento inicial e a gestão da comunicação entre os sensores e os sistemas centrais. Em um sistema IoT, os *Gateways* de Acesso têm papel fundamental ao receber dados dos sensores e transmiti-los para os Servidores *Gateway*, localizados na Rede Core, responsáveis por consolidar e encaminhar as informações. Dos Santos (2019) explica que esses *gateways* podem realizar um pré-processamento, como a filtragem de leituras redundantes, otimizando a transmissão de dados e a eficiência energética do sistema. Além disso, a Rede Core proporciona a infraestrutura necessária para uma comunicação robusta e segura, encapsulando as complexidades operacionais e de implementação do sistema, o que facilita a integração dos sensores com as camadas de processamento e aplicação de dados, sendo um elo essencial entre os sensores e o processamento centralizado.

4.1.2. Cálculo de indicadores e análise de dados

A utilização de Big Data e IA no cálculo de indicadores, como o IQA que trata-se de um índice composto por um conjunto de 10 indicadores, potencializa a eficiência e a precisão do monitoramento dos recursos hídricos. Big Data integra e processa grandes volumes de dados heterogêneos captados em tempo real por sensores IoT distribuídos em bacias hidrográficas, sendo permitido o armazenamento eficiente desses dados de forma rápida. Além disso, a aplicação de algoritmos especializados pode identificar padrões e correlações que facilitam a compreensão das dinâmicas da bacia, ajudando na previsão de cenários críticos, como secas ou inundações. Esses sensores registram variáveis essenciais, como pH, oxigênio dissolvido, temperatura e turbidez, dentre outros parâmetros essenciais, enviando as informações para um servidor central por meio de redes de comunicação, como LoRaWAN, 4G ou 5G. A partir dessa integração, técnicas de IA, como Machine Learning e Deep Learning, são aplicadas para identificar padrões, realizar análises preditivas e calcular o IQA ou outros índices adotados pelos comitês de Bacias Hidrográficas de forma contínua e dinâmica. Os algoritmos de IA ponderam as variáveis capturadas com base nas metodologias definidas, ajustando os cálculos às especificidades locais, como as fontes de poluição características da bacia em estudo. Além disso, modelos preditivos projetam cenários futuros, permitindo a antecipação de medidas para mitigação de impactos. A análise e o processamento dos dados ocorrem no nível de suporte.

Ademais, a Blockchain, por sua vez, adiciona uma camada de segurança e transparência ao sistema, criando um registro imutável de cada transação de dados. Essa tecnologia assegura a integridade e a confiabilidade dos dados coletados e transmitidos, garantindo que nenhuma informação seja adulterada durante o processo. Isso é particularmente importante para a rastreabilidade e a validação das informações utilizadas na tomada de decisão, permitindo que gestores e stakeholders tenham confiança nos dados disponíveis com relação ao estado das bacias hidrográficas em relação às ações implementadas.

No nível de suporte de aplicações, a infraestrutura de Cloud Computing é essencial para fornecer a escalabilidade necessária ao processamento e armazenamento dos grandes volumes de dados produzidos por sensores IoT. Muruganandam et al. (2022) aponta que a arquitetura de computação em nuvem padrão abrange técnicas como computação ubíqua e sob demanda, oferecendo modelos de implantação (nuvens privada, pública e híbrida) e serviços variados, como Software como Serviço (SaaS) e Plataforma como Serviço (PaaS). Além disso, as características da nuvem garantem o suporte adequado à integração e gestão eficiente dos dados IoT.

Os dados coletados são processados em servidores na nuvem e armazenados em bancos de dados distribuídos, garantindo redundância e segurança das informações. No sistema de backend em um sistema IoT, de acordo com Sosa e Sosa (2023), as recepções duplicadas de mensagens são filtradas, e o sistema realiza funções de segurança, verifica a autenticidade dos dados, envia confirmações de recebimento aos dispositivos finais e encaminha a mensagem para o servidor de aplicação correspondente, enquanto o Application Server, por sua vez, hospeda as aplicações responsáveis por processar os dados coletados e gerar insights e relatórios automáticos baseados nas análises de qualidade da água, além de fornecer acesso aos dados em tempo real para os usuários autorizados.

Por fim, no nível de aplicação, os dados processados são apresentados aos gestores e tomadores de decisão por meio de *dashboards* e aplicações web. Esses *dashboards* oferecem uma visão consolidada dos dados, com gráficos e mapas que mostram a qualidade da água em tempo real, a evolução histórica dos indicadores e os pontos críticos da bacia. A visualização de dados é essencial para facilitar a tomada de decisões informadas, permitindo que gestores identifiquem rapidamente áreas de risco e ajustem as ações de mitigação. Além disso, as aplicações podem emitir alertas em tempo real para eventos de poluição aguda, permitindo uma resposta rápida e coordenada.

Outro aspecto crucial do sistema é a integração dos sistemas de informação automatizados já existentes nos comitês de bacias hidrográficas. Esses sistemas possuem dados históricos e indicadores relevantes para a gestão dos recursos hídricos já utilizados em implementados pelos gestores para desenvolvimento de relatórios de situação. Entretanto, a unificação dessas informações em um sistema centralizado de apoio à decisão é essencial para garantir uma análise mais ampla e detalhada dos dados, permitindo a comparação entre os dados históricos e os dados em tempo real coletados via sensoriamento remoto e IoT. A interoperabilidade entre esses sistemas gera uma plataforma robusta de dados que contribui para a elaboração de diagnósticos mais precisos.

4.1.3. Diagnóstico do Plano de Bacias Hidrográficas e Projeção dos resultados através de *dashboards*

Após o processamento, os dados analisados são comparados com os objetivos, metas, indicadores e prazos estabelecidos previamente nos Planos de Bacias Hidrográficas. Essa comparação gera diagnósticos detalhados sobre a eficácia das ações implementadas e o cumprimento ou não das metas estabelecidas, permitindo ajustes contínuos nas estratégias de gestão, ou seja, descontinuidade de algumas ações que não estão dando resultados e/ou propostas de novas ações na busca do cumprimento de metas durante a execução do plano. Esse processo é fundamental para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos e para assegurar que as ações tomadas sejam otimizadas e respondam adequadamente às condições desejadas da bacia.

Os resultados dessas análises são projetados em *dashboards*, que oferecem uma visualização clara e organizada dos dados para os gestores. Esses *dashboards* apresentam os indicadores em gráficos dinâmicos e mapas interativos, facilitando a interpretação dos dados e o acompanhamento das ações em tempo real.

Além disso, tecnologias de Realidade Virtual e Realidade Aumentada podem ser incorporadas para enriquecer o monitoramento. A Realidade Virtual permite a imersão em modelos tridimensionais da bacia, facilitando a análise espacial detalhada, enquanto a Realidade Aumentada sobrepõe dados em tempo real diretamente no ambiente físico, o que possibilita uma tomada de decisão mais ágil durante inspeções de campo.

Em síntese, o sistema de apoio à decisão proposto é uma solução inovadora e robusta para a gestão de bacias hidrográficas, a partir do monitoramento da execução de planos de bacias. Ao integrar sensoriamento remoto, redes IoT, Big Data, IA e Blockchain, o sistema

permite a coleta e análise em tempo real de dados críticos, proporcionando aos gestores uma base sólida para decisões informadas. A utilização de tecnologias avançadas de visualização, como Realidade Virtual e Realidade Aumentada, aprimora ainda mais a capacidade de monitoramento, tornando o sistema uma ferramenta essencial para promover a sustentabilidade e a segurança hídrica nas bacias hidrográficas.

4.2. Aplicação do SAD proposto junto a ações do Plano de Bacias PCJ

A seguir será demonstrado e exemplificado como o SAD proposto poderá ser aplicado ao Plano de Bacias PCJ e para isso foi escolhido do Quadro 3 - Ações elegíveis e prioridade do PRH PCJ 2020 a 2035, ações do item “Enquadramento dos corpos d’água superficiais”, subitem, “1.2.1 Melhorias e recuperação da qualidade da água” e do item “Águas Subterrâneas”, subitem “3.2.1 - Realizar os procedimentos estabelecidos para as áreas de restrição e controle já identificadas nas Bacias PCJ e avaliar a existência de novas áreas”.

4.2.1. Enquadramento dos Corpos d’Água Superficiais: 1.2.1 "Melhoria e recuperação da qualidade das águas"

Para a determinação dos indicadores que avaliem do Enquadramento dos Corpos d’Água Superficiais: 1.2.1 "Melhoria e recuperação da qualidade das águas" no contexto do Plano de Bacias Hidrográficas PCJ, é necessário adotar uma abordagem multidimensional que considere diferentes parâmetros relacionados à qualidade da água. Primeiramente é essencial definir os indicadores a serem monitorados, os valores-alvo e o prazo para seu alcance. Esses indicadores devem ser representativos tanto da condição atual dos corpos d'água quanto da evolução das ações de recuperação ao longo do tempo. Indicadores podem incluir parâmetros físico-químicos, como concentração de oxigênio dissolvido, turbidez, pH, presença de nutrientes, além de concentrações de contaminantes específicos (metais pesados, compostos orgânicos e esgoto não tratado).

Um índice amplamente utilizado para medir a qualidade da água é o Índice de Qualidade da Água (IQA), que, de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005 (2005), agrega diversas variáveis e indicadores físico-químicas e biológicas em um único valor que reflete a condição geral do recurso hídrico. Para o contexto da bacia PCJ, o IQA pode ser adaptado, incorporando parâmetros específicos das principais fontes de poluição da região, como atividades industriais, agrícolas e esgoto doméstico. O cálculo do IQA, de acordo com

Lopes e Júnior (2010), é feito ponderando cada variável de acordo com sua relevância para a qualidade da água, conforme metodologias amplamente aceitas, como a proposta pela National Sanitation Foundation (NSF). O resultado final varia de 0 a 100, indicando a qualidade da água de insatisfatória a excelente, e é utilizado para monitorar a eficácia das ações de recuperação.

A coleta de dados para alimentar o cálculo do IQA pode ser feita por sensores IoT, instalados em pontos estratégicos ao longo dos rios e reservatórios da bacia, medindo continuamente parâmetros como pH, temperatura, oxigênio dissolvido e condutividade elétrica. Esses sensores transmitem os dados em tempo real por meio de redes 4G ou 5G para uma central de processamento, onde tecnologias de Big Data agregam e normalizam as leituras, permitindo uma análise representativa da qualidade da água em toda a bacia ou em áreas específicas. O uso de Big Data possibilita a análise de grandes volumes de dados, gerando *insights* em tempo real e facilitando a identificação de padrões de poluição.

A IA desempenha um papel crucial nesse processo, não apenas automatizando o cálculo do IQA, mas também integrando dados de múltiplas fontes e aplicando modelos preditivos para identificar anomalias e prever possíveis crises de qualidade da água, como episódios de eutrofização. A IA pode realizar análises com base em padrões históricos e previsões futuras. Além disso, a IA pode gerar simulações que auxiliam na avaliação de diferentes cenários de recuperação, prevendo os impactos a longo prazo das intervenções propostas.

Após o cálculo do IQA e a análise dos dados coletados, os resultados são comparados com dados históricos para avaliar a eficácia das ações implementadas. Essa comparação pode ser visualizada em *dashboards*, que utilizam gráficos dinâmicos para mostrar a evolução do IQA ao longo do tempo, destacando melhorias ou eventuais deteriorações. Tecnologias de Big Data também são fundamentais nesse contexto, pois permitem cruzar grandes volumes de dados históricos com as informações em tempo real, facilitando a identificação de tendências e padrões de poluição que possam não ser detectados em análises convencionais.

Para garantir a integridade dos dados e a transparência do processo, a Blockchain pode ser utilizada. Cada leitura de sensor e cada cálculo do IQA são registrados de forma imutável, assegurando que os diagnósticos e comparações sejam baseados em informações confiáveis. Isso é particularmente relevante em um contexto de múltiplos atores envolvidos na gestão dos recursos hídricos, promovendo a confiança entre stakeholders e permitindo uma auditoria completa das ações e resultados.

A integração do IQA com tecnologias de RA e RV permite uma visualização mais interativa e imersiva das condições das bacias hidrográficas. A RA, ao sobrepor elementos virtuais sobre o ambiente real, pode ser utilizada para apresentar os dados do IQA diretamente em mapas interativos ou através de dispositivos móveis, como smartphones e óculos inteligentes. Dessa forma, gestores podem acessar informações detalhadas sobre a qualidade da água em tempo real, visualizando diretamente no local a condição dos rios e reservatórios, representada por indicadores e gráficos sobrepostos ao ambiente físico, o que auxilia na compreensão das condições hídricas, tornando os dados técnicos mais acessíveis e intuitivos.

Já a RV permite criar simulações imersivas das bacias hidrográficas, possibilitando a análise detalhada de diferentes cenários de qualidade da água. Por meio de ambientes tridimensionais gerados com base nos dados do IQA, os usuários podem explorar virtualmente os pontos da bacia hidrográfica, observar representações dos parâmetros físico-químicos e biológicos, e visualizar os impactos de intervenções específicas na qualidade da água. Essa abordagem é particularmente útil para o planejamento de ações de recuperação de maneira granular, pois permite uma experimentação segura e eficaz antes da implementação de medidas no ambiente real.

4.2.2. Águas Subterrâneas: 3.2.1 - Realizar os procedimentos estabelecidos para as áreas de restrição e controle já identificadas nas Bacias PCJ e avaliar a existência de novas áreas

Para atender à meta de Águas Subterrâneas: 3.2.1 "Realizar os procedimentos estabelecidos para as áreas de restrição e controle já identificadas nas Bacias PCJ e avaliar a existência de novas áreas." é possível utilizar sensores IoT, sensoriamento remoto e análises avançadas para fornecer informações essenciais em tempo real, permitindo a avaliação de áreas de restrição e de possíveis novas áreas contaminadas. Na prática, o SAD possibilita uma integração e consolidação de dados críticos para a tomada de decisões estratégicas e ágeis, assegurando o monitoramento contínuo e a adaptação das ações de gestão hídrica com base em informações robustas e atualizadas. Para essa ação, também é necessário determinar os indicadores a serem monitorados, os valores desejados e o prazo para sua obtenção.

O monitoramento de áreas de restrição e controle nas Bacias PCJ pode ser aprimorado por meio do uso de sensores IoT, que fornecem dados detalhados e em tempo real sobre variáveis ambientais, permitindo a identificação de novas áreas contaminadas e o acompanhamento de fontes de poluição. Esse monitoramento é essencial para a gestão e

conservação da qualidade da água e para a sustentabilidade dos recursos hídricos na região. Entre os sensores de destaque para essa tarefa, os sensores de qualidade da água desempenham um papel central, pois medem parâmetros como pH, oxigênio dissolvido, condutividade, turbidez e temperatura.

Essas medições são fundamentais para detectar mudanças na qualidade da água, podendo utilizando do Índice de Qualidade da Água (IQA), que, de acordo com a Resolução CONAMA 357/2005 (2005) indica a presença de poluentes, seja por ação de atividades agrícolas, industriais ou urbanas, facilitando uma rápida resposta a potenciais contaminações.

O uso de tecnologias IoT, como sondas multiparâmetros e data loggers sem fio, proporciona uma forma eficiente de monitorar a qualidade das águas subterrâneas de maneira contínua e em tempo real. Sensores multi parâmetros, capazes de medir parâmetros como pH, temperatura, condutividade e oxigênio dissolvido, são cruciais para a avaliação da qualidade da água em poços e fontes subterrâneas. Esses dados podem ser coletados sem fio e transmitidos a sistemas de monitoramento centralizados, permitindo que as condições da água sejam avaliadas de forma remota e precisa, sem a necessidade de intervenção manual.

Sensores com capacidade de personalização e operação por dispositivos móveis facilitam o monitoramento em campo, oferecendo maior flexibilidade para adaptar os sensores às especificidades das condições locais, como a salinidade em águas subterrâneas. Além disso, sua impermeabilidade e resistência à corrosão garantem a durabilidade dos sensores em ambientes subterrâneos e aquáticos diversos.

Além das sondas multiparâmetros, os data loggers desempenham papel fundamental na coleta e registro de dados sobre condutividade, temperatura, profundidade e salinidade, essenciais para a análise da qualidade das águas subterrâneas. Dispositivos de monitoramento de longo prazo permitem acompanhar parâmetros como nível de água, temperatura e condutividade elétrica por anos, sem a necessidade de manutenção, oferecendo dados contínuos e de alta qualidade.

Sensores adicionais, com a capacidade de medir em profundidades variadas, ampliam a abrangência das análises. Com a capacidade de monitorar em tempo real e a vantagem de operar sem a necessidade de manutenção constante, esses instrumentos IoT são essenciais para o gerenciamento de redes de monitoramento de águas subterrâneas e a implementação de soluções para o controle e preservação dos recursos hídricos. A coleta e análise desses dados são fundamentais para a realização de uma Avaliação Preliminar de Áreas Contaminadas, que apoia a tomada de decisões para a proteção ambiental e a gestão sustentável dos recursos

hídricos da região, colaborando para a preservação das bacias e a promoção da qualidade ambiental.

Os dados coletados são transmitidos por redes de comunicação 4G, 5G ou LoRaWAN, que possibilitam a transmissão contínua e em tempo real para um servidor central, onde os dados são armazenados e processados com o suporte de tecnologias de Big Data e IA. A aplicação de algoritmos de IA permite uma análise preditiva das condições ambientais, identificando tendências que indicam degradação hídrica ou o surgimento de novas áreas impactadas. Essa análise facilita a geração de relatórios diagnósticos que comparam o estado atual das bacias com os parâmetros estabelecidos nos Planos de Bacias, auxiliando na adaptação e priorização das ações necessárias.

Primeiramente, a análise de séries temporais é essencial para identificar padrões e mudanças sazonais ou graduais em parâmetros ambientais, como qualidade da água e nível de poluição. Modelos de IA podem ser aplicados para prever futuras variações, oferecendo uma visão proativa para o planejamento e mitigação de impactos ambientais.

Além disso, ao correlacionar variáveis como precipitação e concentração de poluentes, esses cálculos auxiliam na identificação das causas e dos fatores externos que influenciam a qualidade ambiental das áreas de restrição, promovendo uma abordagem mais direcionada para a tomada de decisões.

A detecção de anomalias é outra etapa crucial, que pode ser realizada utilizando algoritmos de machine learning que permitem identificar valores fora do padrão, indicando possíveis eventos anômalos de contaminação ou falhas no sistema de monitoramento. Identificar essas anomalias em tempo real é fundamental para que se possam tomar medidas rápidas de contenção e controle ambiental.

Por fim, a interpolação espacial e a análise geoestatística, utilizando técnicas como Krigagem e Inverse Distance Weighting (IDW), são úteis para preencher lacunas de dados em áreas não cobertas diretamente pelos sensores, conforme explicado por Ferreira et al. (2017). Esses cálculos possibilitam uma visão mais abrangente e contínua das condições ambientais, cobrindo a vasta extensão das Bacias PCJ. Integrando esses métodos de análise, Big Data e IA proporcionam uma de monitoramento, onde os gestores podem identificar áreas críticas e responder rapidamente a qualquer alteração nas condições ambientais, promovendo a preservação e o uso sustentável dos recursos hídricos.

Além da coleta e processamento de dados, o sistema apresenta as informações em *dashboards*, nos quais os gestores podem visualizar a qualidade da água em tempo real, a localização das áreas de restrição e as novas áreas identificadas como potenciais focos de

contaminação. Os dados são exibidos em mapas e gráficos dinâmicos, proporcionando uma visualização clara e organizada. Tecnologias de Realidade Aumentada e Virtual também podem ser integradas para facilitar inspeções de campo, ampliando a compreensão espacial das áreas monitoradas.

Após a demonstração por meio dos exemplos e o levantamento bibliográfico a respeito das tecnologias e suas aplicações, percebe-se que o uso combinado de tecnologias avançadas, como IoT, Big Data, IA, Blockchain, Realidade Aumentada e Realidade Virtual, pode auxiliar na determinação precisa dos indicadores que avaliam a meta de melhoria da qualidade das águas e abordagem dinâmica para o monitoramento e adaptação contínua das ações de recuperação. Essas ferramentas se aplicadas permitem que os gestores tenham acesso a informações atualizadas e detalhadas, promovendo uma recuperação eficiente e sustentada dos recursos hídricos na bacia PCJ.

5. Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Conforme abordado no desenvolvimento deste trabalho, a água é um dos fatores fundamentais para a sobrevivência dos seres vivos, e devido à sua limitação do que diz respeito à quantidade e qualidade adequadas para o consumo e abastecimento torna-se indispensável uma gestão sustentável deste recurso. Portanto, o desenvolvimento do modelo conceitual de um SAD para auxiliar na gestão de recursos hídricos através do monitoramento das metas e ações dos PBH representa um avanço significativo na integração entre tecnologia e sustentabilidade.

Desse modo, o objetivo desse projeto de pesquisa foi explorar possibilidades de um SAD que se baseia em indicadores cuja coleta de dados, cálculo e análise é auxiliado por Tecnologias da Informação e Comunicação TIC inovadoras, tais como IoT, Big Data, IA, Blockchain, Realidade Virtual e Realidade Aumentada, associadas a metodologias tradicionais de gestão, potencializa o monitoramento, a análise e a tomada de decisão no contexto dos PBH, propondo um modelo teórico que poderia ser desenvolvido em pesquisas futuras para a gestão sustentável de recursos hídricos aplicado aos planos de bacias hidrográfica

A centralização e captura de dados históricos e em tempo real representam uma das principais inovações propostas pelo modelo, pois possibilitam um acompanhamento contínuo das condições ambientais conforme o andamento dos projetos e ações estabelecidos nos PBH. Essa abordagem é complementada pelo uso de *dashboards* e ferramentas avançadas de visualização, que facilitam a análise das informações pelos gestores e promovem a identificação de tendências e padrões. Tais funcionalidades, descritas no Capítulo 4 e ilustradas na Figura 1, conferem ao modelo proposto uma aplicabilidade prática robusta, com potencial para transformar a gestão hídrica.

O modelo teórico de SAD explorado neste trabalho incorpora tecnologias inovadoras para aprimorar o monitoramento dos recursos hídricos e a avaliação das metas e planos estabelecidos pelos PBH. Isso permite um acompanhamento mais frequente e detalhado das condições das bacias hidrográficas, possibilitando a observação contínua dos resultados das ações implementadas. A partir da implementação de sensores IoT em pontos estratégicos das bacias, o sistema é capaz de capturar parâmetros essenciais para a análise da água, como os parâmetros que integram o IQA. Quando combinados a históricos de dados armazenados, estes parâmetros fornecem uma visão abrangente do estado dos recursos hídricos ao longo do tempo, elemento crucial para embasar o processo decisório.

Os dados capturados podem ser processados em tempo real com o auxílio de tecnologias de Big Data e algoritmos de IA, incluindo técnicas de Machine Learning e Deep Learning, permitindo sua transformação em informações acionáveis e de fácil interpretação pelos gestores. Essa capacidade não apenas facilita a compreensão imediata das condições hídricas, mas também possibilita a realização de previsões baseadas em modelos estatísticos construídos a partir de séries históricas. O machine learning possibilita a criação de modelos preditivos baseados em séries históricas e variáveis ambientais, enquanto Deep Learning pode ser empregado para identificar padrões mais complexos nos dados, como anomalias ou correlações que não seriam facilmente detectadas por métodos tradicionais.

Assim, a eficácia das ações implementadas nos PBH pode ser monitorada de maneira contínua, com avaliações precisas de seu desempenho em relação às metas estabelecidas. Com a criação de indicadores específicos para cada uma das metas estabelecidas nos PBH é possível mensurar o andamento da situação dos recursos hídricos de maneira mais clara. A integração de tecnologias avançadas ao modelo representa outra prioridade. É essencial o desenvolvimento de algoritmos baseados em IA para análises preditivas, identificação de padrões e geração de alertas, otimizando assim o processo de tomada de decisão.

Além disso, foi considerada a integração da tecnologia Blockchain ao modelo como uma solução promissora para garantir a confiabilidade e segurança dos dados gerados. Essa abordagem assegura que as informações registradas sejam imutáveis e rastreáveis, impedindo sua adulteração e promovendo a transparência no processo de coleta e análise de dados. Essa característica é relevante em contextos colaborativos, nos quais múltiplos *stakeholders* dependem da integridade dos dados para tomada de decisão.

A proposta do modelo teórico de um SAD também incluiu a geração de *dashboards* avançados como ferramentas para visualização e análise de dados pelos gestores. Esses *dashboards* apresentam os indicadores em gráficos dinâmicos organizados de forma clara para facilitar a interpretação e o acompanhamento em tempo real das ações implementadas. Adicionalmente, o uso de tecnologias como Realidade Virtual e Realidade Aumentada surge como uma oportunidade promissora para enriquecer o processo de monitoramento de forma interativa.

O estudo também destacou que a frequência atual dos relatórios gerados e disponibilizados para monitorar o cumprimento do PBH PCJ 2020-2035, utilizado para embasar a pesquisa, é insuficiente, resultando em dificuldades na obtenção de informações completas e atualizadas. Esse cenário é agravado pela dependência de levantamentos de dados realizados pelos municípios, tornando o processo lento e trabalhoso. O SAD proposto busca

solucionar essas limitações ao automatizar a coleta e o processamento de dados, proporcionando maior precisão, eficiência e controle no acompanhamento dos recursos hídricos. Dessa forma, o sistema auxilia diretamente na avaliação e monitoramento do PBH PCJ 2020-2035, garantindo uma gestão mais robusta e sustentável dos recursos hídricos.

Os resultados deste estudo reafirmam a relevância de soluções tecnológicas avançadas na promoção da segurança hídrica e no cumprimento das metas propostas pelos ODS, especialmente o ODS 6. O modelo proposto não apenas pode contribuir para a gestão hídrica sustentável, mas também se configura como uma solução robusta, com potencial para transformar a forma como os recursos naturais são monitorados e geridos. Ao aliar tecnologias a uma abordagem colaborativa, o SAD oferece uma resposta eficiente e escalável às demandas globais por segurança hídrica e ambiental.

Assim, pode-se considerar que o trabalho atendeu aos objetivos propostos, de explorar possibilidades de um SAD que se baseia em indicadores cuja coleta de dados, cálculo e análise é auxiliado por TICs inovadoras propondo um modelo teórico, através do levantamento de informações presentes no referencial teórico com relação à bacias hidrográficas, gestão de recursos hídricos, Planos de Bacias Hidrográficas, conceitos de Sistemas de Apoio à Decisão e principais características de tecnologias emergentes que poderiam ser aplicadas ao sistema.

Portanto, a proposta de um modelo teórico e conceitual de um SAD, ao se explorar as possibilidades de utilização de TIC com os sistemas de informação já utilizados pelos gestores, representa um avanço significativo na gestão hídrica. Essa integração não apenas tem a capacidade de ampliar a confiabilidade dos dados gerados, mas também assegura uma maior frequência na obtenção de informações atualizadas, permitindo que as ações planejadas sejam revisadas e adaptadas de forma ágil e eficiente. Dessa maneira, torna-se possível garantir o acesso sustentável à água de qualidade para todos os setores da sociedade, considerando a finitude desse recurso essencial.

Além disso, através da demonstração de possível aplicação do SAD ao PBH PCJ descrito no Capítulo 4, nota-se que a dependência de intervenções humanas no processo de captura e cálculo de indicadores é reduzida, automatizando essas etapas e minimizando possíveis erros operacionais. Essa abordagem contribui para uma gestão mais proativa e baseada em dados, fundamental para enfrentar os desafios impostos pelo crescimento populacional, mudanças climáticas e demandas crescentes por recursos hídricos.

Embora o modelo conceitual proposto neste estudo tenha demonstrado a possibilidade de contribuições para a gestão sustentável de recursos hídricos, avanços em sua aplicação

prática e validação em cenários reais são indispensáveis. Uma recomendação para próximos estudos fundamentais é o desenvolvimento e a implementação futura de um protótipo funcional do SAD. Esse protótipo deve incluir sensores IoT para coleta de dados em tempo real, associados a redes de comunicação, como LoRaWAN e 5G. A avaliação de precisão, custos operacionais e viabilidade técnica do sistema em diferentes bacias hidrográficas permitirá identificar desafios específicos relacionados às variáveis ambientais, condições geográficas e outras particularidades regionais.

Por fim, investigações futuras sobre a interoperabilidade do modelo com outros sistemas de gestão ambiental e políticas públicas, bem como sua interação com iniciativas urbanas como cidades inteligentes, poderão maximizar o impacto do SAD, promovendo uma abordagem colaborativa e abrangente para a gestão hídrica sustentável.

A escalabilidade e adaptabilidade do modelo também devem ser considerados como estudos futuros, uma vez que testar sua aplicabilidade em diferentes contextos regionais e estudar a replicabilidade em outras regiões são passos fundamentais para ampliar sua relevância. Ajustes que considerem a disponibilidade de infraestrutura tecnológica, recursos financeiros e engajamento social local são cruciais para garantir o sucesso dessa expansão. Essas direções de pesquisa complementar não apenas reforçam as bases estabelecidas por este trabalho, mas também abrem caminhos para o avanço das estratégias de gestão hídrica em escala global.

6. Referências bibliográficas

ACQUANET. **Manual do usuário.** Disponível em: http://www.labsid.com.br/download.php?area=arquivo&id=16&arq=5140c7a3b3624_Manual_AcquaNet_com_SIG.pdf.

AGÊNCIA DAS BACIAS PCJ. **Uso da água.** 2020. Disponível em: <https://agencia.baciaspcj.org.br/bacias-pcj/uso-da-agua/>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Reservatórios do semiárido brasileiro: hidrologia, balanço hídrico e operação,** 2017.

ALI, M.; ALI, M. M.; MUSTAFA, M. R. U.; KIM, J. H. Water Quality Index Using Modified Random Forest Technique: Assessing Novel Input Features. **Computer Modeling in Engineering & Sciences**, [S.l.], v. 132, n. 3, p. 1011-1034, 2023.

ALMEIDA, Lorena Sampaio; COTA, Ana Lídia Soares; RODRIGUES, Diego Freitas. Saneamento, Arboviroses e Determinantes Ambientais: impactos na saúde urbana. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 25, p. 3857-3868, 2020.

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. www.anatel.gov.br, 2013.

AZEVEDO, Victor Mendonça de; MACIEL, Alexandre Magno Andrade; DA GAMA, Kiev Santos. Solução IoT de Monitoramento de Poços para Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 3, n. 3, 2018.

BARBOSA, Gilka Rocha; ALMEIDA, AT de. Sistemas de apoio à decisão sob o enfoque de profissionais de TI e de decisores. **Anais XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção 2002**, p. 1-8, 2002.

BARELLA, W.; SMITH, W.; PETRERE, M.; MONTAG, L. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. **Matas ciliares: conservação e recuperação**, [S. l.], p. 187– 207, 2000.

BAYER, Natássia Molina; URANGA, Paulo Ricardo Ricco; FOCHEZATTO, Adelar. Política Municipal de Saneamento Básico ea ocorrência de doenças nos municípios brasileiros. urbe. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 13, p. e20190375, 2021.

BEGA, J. M. M., BORGES, A. do V., LAGO, C. A. F. do ., MENDES, J. P., AZEVEDO, P. de T. de ., SANTOS, W. J. R. dos ., & MARIOSIA, D. F.. Sustainability Assessment of Sanitation Indicators in the PCJ Watersheds 2020-2035 Plan. **Ambiente & Sociedade**, 24, e0247, 2021. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200247vu2021L4DE>

BELLUZZO, Bruno Gallo; IGARASHI, Massaki de Oliveira. BIG Data, **Mineração de Dados e Aplicações na Engenharia Civil**. 2016.

BEZERRA, Saulo de Tarso Marques; PERTEL, Monica; MACÊDO, José Eloim Silva de. Avaliação de desempenho dos sistemas de abastecimento de água do Agreste brasileiro. **Ambiente construído**, v. 19, p. 249-258, 2019.

BORTOLIN JR, Sérgio Antônio Martini. Sistemas de Apoio à Decisão. **INFOCAMP**, Recife, p. 1-11, 2011.

BOTEGA, Leonardo Castro; CRUVINEL, Paulo Estevão. **Realidade virtual: histórico, conceitos e dispositivos**. Anais do XI Simpósio de realidade virtual e aumentada, Pontificia Universidade Catolica do Rio Grande do Sul, 2009.

BRAGA, Antonio Rafael et al. Gerenciamento térmico e elétrico de um centro de dados utilizando sensoriamento iot. In: **Simpósio Brasileiro de Computação Ubíqua e Pervasiva (SBCUP)**. SBC, 2017.

BRAGA, Alexandre Melo; MARINO, Fernando C. Herédia; DOS SANTOS, Robson Romano. Segurança de aplicações Blockchain além das criptomoedas. **Sociedade Brasileira de Computação**, 2017.

BRASIL. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. LEI Nº 9.433, 1997, disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/politica-nacional-de-recursos-hidricos>.

CADAVIECO, Javier Fombona; GOULÃO, Maria de Fátima; GARCIA TAMARGO, Marco Antonio. Melhorar a atratividade da informação através do uso da realidade aumentada. **Perspectivas em ciencia da informação**, v. 19, p. 37-50, 2014.

CARTER, Nicole; KREUTZWISER, Reid D.; DE LOË, Rob C. Closing the circle: linking land use planning and water management at the local level. **Land use policy**, v. 22, n. 2, p. 115-127, 2005.

CARVALHO, José Ribamar Marques de et al. Proposta e validação de indicadores hidroambientais para bacias hidrográficas: estudo de caso na sub-bacia do alto curso do Rio Paraíba, PB. **Sociedade & Natureza**, v. 23, p. 295-310, 2011.

CARVALHO, José Ribamar Marques de; CURI, Wilson Fadlo; LIRA, Waleska Silveira. Processo participativo na construção de indicadores hidroambientais para bacias hidrográficas. **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa. Campina Grande: EDUEPB**, p. 31-80, 2013.

CASTELLANO, Maria. **Relações entre poder público e sociedade na gestão dos recursos hídricos: o caso do Consórcio Intermunicipal das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

CHAFFIN, Brian C. et al. Transformative environmental governance. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 41, p. 399-423, 2016.

CHAVES, Leonardo Corrêa et al. Model Development to support the process of developing a Decision Support System. **Jistem-Journal of Information Systems and Technology Management**, v. 17, 2020.

CHRISTOFIDIS, Demetrios; ASSUMPÇÃO, Rafaela dos Santos Facchetti Vinhaes; KLIGERMAN, Débora Cynamon. A evolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza. **Saúde em Debate**, v. 43, p. 94-108, 2020.

COMITÊS PCJ. **Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí 2020 a 2035: Relatório Síntese**. Piracicaba: Consórcio Profill-Rhama, 2020. 129p, disponível em: https://www.comitespcj.org.br/index.php?option=com_content&view=article&id=957:pb-pcj-2020-2035

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. Relatório 2023. São Paulo: CETESB, 2023.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n.º 357**, de 17 de março de 2005. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil. Brasília, Ministério do Meio Ambiente, 2005.

CONSÓRCIO PROFILL-RHAMA. Plano de Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, 2020 a 2035 (**Relatório Síntese**), Piracicaba, SP, 2020.

COSTA, T.T.C et al. Vulnerabilidade ambiental em sub-bacias hidrográficas no estado do Rio de Janeiro por meio da integração temática da perda do solo (USLE), variáveis morfométricas e o uso/cobertura. In: **Simpósio de Sensoriamento Remoto**, 13, 2007, Florianópolis. Florianópolis, 2007. p. 2493-2500

DIAS, Isabel Cristina Lopes et al. **Indicadores de sustentabilidade de bacia hidrográfica e hidroquímica de poços no estado do Maranhão: subsídios ao gerenciamento e conservação dos recursos hídricos**, 2018.

DOS SANTOS, Izaias Batista et al. Internet das coisas (IoT) aplicada ao agronegócio: Projeto e implementação de um gateway de IoT sobre a plataforma Arduino para simplificar a automatização da aquicultura. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 11, p. 26631-26653, 2019.

FARIA, Simone Alves de; FARIA, Ricardo Coelho de. Cenários e perspectivas para o setor de saneamento e sua interface com os recursos hídricos. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 9, p. 202-210, 2004.

FAYYAD, U.M. et al. From data mining to knowledge discovery: an overview. In: U.M. Fayyad, U.M. et al (Eds.). **Advances in knowledge discovery and data mining**. Menlo Park (CA)/Cambridge (MA): AAAI, 1996.

VALENCIO, NFLS; MARTINS, Rodrigo Constate; LEME, Alessandro André. A água como valor social: considerações acerca de uma prática acadêmica em torno do tema. **Uso e gestão de recursos hídricos no Brasil: velhos e novos desafios para a cidadania**, São Carlos: Ed RiMa, p. 3-16, 2001.

FERNANDES, JOSÉ GUILHERME DOS SANTOS; SANTOS, ADRIANO MADUREIRA DOS; SERUFFO, MARCOS CÉSAR DA ROCHA. INDICADORES ANTRÓPICOS: Estudo comparativo para a sustentabilidade na Amazônia. **Novos estudos CEBRAP**, v. 43, n. 1, p. 65-89, 2024.

FERREIRA, Italo Oliveira et al. In bathymetric surfaces: IDW or Kriging?. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 3, p. 493-508, 2017.

FRITZEN, Maycon; BINDA, Andrey Luis. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidade, hidrologia e impactos no ambiente. **Ateliê Geográfico**, v. 5, n. 3, p. 239-254, 2011.

GALIOTO, F.; CHATZINIKOLAOU, P.; RAGGI, M.; VIAGGI, D. The value of information for the management of water resources in agriculture: Assessing the economic viability of new methods to schedule irrigation. **Agricultural Water Management**, [S. l.], v. 227, p. 105848, 2020.

GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de pesquisa**. Plageder, 2009.

GHOLAMI, V.; CHOUBIN, B.; RAHMATI, O.; SAJEDI-HOSSEINI, F.; PRADHAN, B. River water quality assessment using environmentric techniques: a case study of Jakara River Basin. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 7, 2017.

GIESEL, HEDWIK D.; NOBRE, FARLEY SM. Implicações de Blockchain e transparência para a sustentabilidade empresarial: Revisão integrativa. RAM. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 22, p. eRAMD210033, 2021.

GIL, Antônio C. Como elaborar projetos de pesquisa. 3. ed. **São Paulo: Atlas**, 1996. Métodos e técnicas em pesquisa social. 5. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 7. ed. **São Paulo: Atlas**, 2008.

GOMES, C. F. S.; NUNES, K. R. A.; XAVIER, L. H.; CARDOSO, R.; VALLE, R. Multicriteria decision making applied to waste recycling in Brazil. **Omega**, [S. l.], v. 36, n. 3, p. 395–404, 2008.

IBGE. Síntese dos indicadores sociais: uma análise das condições de vida da população brasileira. **Rio de Janeiro: IBGE**, 2008.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Diretrizes para avaliação da balneabilidade das águas brasileiras**. Brasília: IBAMA, 2021.

JANNUZZI, C. A. S. C.; FALSARELLA, O. M.; SUGAHARA, C. R. Sistema de informação: um entendimento conceitual para a sua aplicação nas organizações empresariais. **Perspectivas em Ciência da Informação**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 94–117, 2014. DOI: 10.1590/1981-5344/1927.

JÚNIOR, Sérgio Antônio Martini Bortolin. **Sistemas de Apoio à Decisão**. Julho de, 2006.

KALEHHOUEI, M.; HAZBAVI, Z.; SPALEVIC, V. What is smart watershed management?. **Agriculture & Forestry/Poljoprivreda i Sumarstvo**, v. 67, n. 2, 2021

KAMYAB, Hesam et al. The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management. **Results in Engineering**, p. 101566, 2023.

KELEKO, Aurelien Teguede et al. Artificial intelligence and real-time predictive maintenance in industry 4.0: a bibliometric analysis. **AI and Ethics**, v. 2, n. 4, p. 553-577, 2022.

KOLODNER, J. K. Case-based reasoning. **San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers**, 1993.

KIM, Hyunho et al. Artificial intelligence in drug discovery: a comprehensive review of data-driven and machine learning approaches. **Biotechnology and Bioprocess Engineering**, v. 25, p. 895-930, 2020.

KUMAR, P.; KUMAR, R.; SHARMA, A.; RANI, A.; KUMAR, N. A Machine Learning-Based Water Potability Prediction Model by Using Synthetic Minority Oversampling Technique and Explainable AI. **Computational Intelligence and Neuroscience**, v. 2022, p. 1-14, 2022.

LACERDA, C. de S.; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. Modelos de indicadores de sustentabilidade para gestão de recursos hídricos. **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa [online]. Campina Grande: EDUEPB**, p. 13-30, 2013.

LAUDON, K. C.; LAUDON, J. P. Sistemas de Informação Gerenciais. **São Paulo: Pearson Prentice Hall**, 2010.

LEAL, A. C. Gestão urbana e regional em bacias hidrográficas: interfaces com o gerenciamento de recursos hídricos. In: BRAGA, Roberto; CARVALHO, Pompeu Figueiredo (org). **Recursos hídricos e planejamento urbano e regional. Rio Claro: Laboratório de Planejamento Municipal/DEPLAN/UNESP/IGCE**, 2003. p.65-85.

CHEN, Yingyi et al. A review of the artificial neural network models for water quality prediction. **Applied Sciences**, v. 10, n. 17, p. 5776, 2020.

LIN, Jie et al. A survey on internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications. **IEEE internet of things journal**, v. 4, n. 5, p. 1125-1142, 2017.

LIRA, Waleska Silveira; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. **Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa**. Eduepb, 2013.

LOPES, Frederico Wagner de Azevedo; JÚNIOR, Antônio Pereira Magalhães. Influência das condições naturais de pH sobre o índice de qualidade das águas (IQA) na bacia do Ribeirão de Carrancas. **Revista Geografias**, p. 134-147, 2010.

LOWE, Matthew; QIN, Ruwen; MAO, Xinwei. A review on machine learning, artificial intelligence, and smart technology in water treatment and monitoring. **Water**, v. 14, n. 9, p. 1384, 2022.

LUCHINI, Adriana de Mello. Os desafios à implementação do sistema de gestão dos recursos hídricos estabelecido pela Lei nº 9.433/97. **Revista de Administração Pública**, v. 34, n. 1, p. 123 a 143-123 a 143, 2000.

LUVIZAN, Simone S.; MEIRELLES, Fernando S.; DINIZ, Eduardo H. Big Data: publication evolution and research opportunities. In: **Anais da 11a Conferência Internacional sobre Sistemas de Informação e Gestão de Tecnologia**. São Paulo, SP, 2014.

MACHADO, Ricardo Augusto Souza et al. Análise morfométrica de bacias hidrográficas como suporte a definição e elaboração de indicadores para a gestão ambiental a partir do uso de geotecnologias. **XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, INPE, p. 1441-1448.30, 2011.

MAGALHÃES JÚNIOR, A. P. Indicadores Ambientais e Recursos Hídricos: Realidade e Perspectivas para o Brasil a partir da Experiência Francesa. **2. ed. Editora Bertrand Brasil**, 2010.

MAGALHÃES, Rafael Caldeira; BARP, Ana Rosa Baganha. Inovações metodológicas para construção de cenários estratégicos em bacias hidrográficas. **RAI Revista de Administração e Inovação**, v. 11, n. 3, p. 200-226, 2014.

MASCARENHAS, Luciane Martins de Araújo; FERREIRA, Manuel Eduardo; FERREIRA, Laerte Guimarães. Sensoriamento remoto como instrumento de controle e proteção ambiental:

análise da cobertura vegetal remanescente na bacia do rio Araguaia. **Sociedade & natureza**, v. 21, p. 5-18, 2009.

MCINTOSH, Brian S. et al. Environmental decision support systems (EDSS) development—Challenges and best practices. **Environmental Modelling & Software**, v. 26, n. 12, p. 1389-1402, 2011.

MINAYO, M. C. de S. (Org.). O desafio do conhecimento: pesquisa qualitativa em saúde. 14ª ed. **Rio de Janeiro: Hucitec**, 2014. 408 p.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO - **MP Indicadores Orientações Básicas Aplicadas à Gestão Pública 1ª Edição Brasília/DF**, 2012.

MIRANDA, Bruno de Almeida. SIMIA: Sistema Inteligente de Monitoramento e Interação Assistida para hospitais. 2023.

MIZUTANI, Meriellen Nuvolari Pereira; DE MELO CONTI, Diego. Indicadores De Sustentabilidade Como Ferramenta De Gestão No Planejamento Urbano: Um Estudo Sobre A Cidade De Barueri. **Humanidades & Inovação**, v. 8, n. 46, p. 300-317, 2021.

MUÑOZ, Héctor Raúl (org). **Interfaces da gestão de recursos Hídricos** - Desafios da Lei de Águas de 1997. MMA/SRH, 2000.

MURUGANANDAM, Sumathi et al. Blockchain based adaptive resource allocation in cloud computing. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 65, p. e22220025, 2022.

NASCIMENTO, Francisco Paulo do; SOUSA, Flávio Luís Leite. Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática—como elaborar TCC. **Brasília: Thesaurus**, 2016.

NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável**, 2015.

NESELLO, Priscila; FACHINELLI, Ana Cristina. The effects of big data over the analytical activities of strategic intelligence professionals in Brazil. **Perspectivas em Ciência da Informação**, v. 24, p. 87-102, 2019.

NETTO, Antonio Valerio; MACHADO, Liliane dos Santos; OLIVEIRA, Maria Cristina Ferreira de. **Realidade virtual-definições, dispositivos e aplicações**. 2002.

NEVES, Mateus Aparecido Tonin. **Internet das coisas (IOT): introdução e visão geral de aplicações**. 2021

NIE, Xiangtian et al. Big data analytics and IoT in operation safety management in under water management. **Computer Communications**, v. 154, p. 188-196, 2020.

NOGUEIRA, Helena Isabel Silva. Os sistemas de apoio à decisão na área dos cuidados primários: implementação de um sistema de apoio à decisão numa unidade de saúde. **Páginas a&b: arquivos e bibliotecas**, p. 108-114, 2014.

PAIVA SOBRINHO, Ranulfo et al. Blockchain technology and complex flow systems as opportunities for water governance innovation. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 18, p. 157-176, 2022.

PAIXÃO, Gabriela Miana de Mattos et al. Machine Learning na Medicina: Revisão e Aplicabilidade. **Arquivos brasileiros de cardiologia**, v. 118, p. 95-102, 2022.

PATZLAFF, Jeferson Ost; KERN, Andrea Parisi; GONZÁLEZ, Marco Aurélio Stumpf. Projeto de edificações com apelo sustentável: elementos para a construção de um sistema de apoio à decisão. **Revista Produção Online**, v. 10, n. 3, p. 479-503, 2010.

PERDOMO, José et al. User performance in a 5G multi-connectivity ultra-dense network city scenario. In: 2020 **IEEE 45th Conference on Local Computer Networks (LCN)**. IEEE, 2020. p. 195-203.

PEREIRA, Marco Alésio Figueiredo; BARBIEIRO, Bruno Lippo; QUEVEDO, Daniela Muller de. Importância do monitoramento e disponibilização de dados hidrológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos. **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 292-303, 2022.

PERES, Renata Bovo; SILVA, Ricardo Siloto da. Análise das relações entre o Plano de Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré e os Planos Diretores Municipais de Araraquara, Bauru e São Carlos, SP: avanços e desafios visando a integração de instrumentos de gestão. **Sociedade & Natureza**, v. 25, p. 349-362, 2013.

PIMENTEL, K. & TEIXEIRA, K. Virtual reality - through the new looking glass. 2.ed. **New York, McGraw-Hill**, 1995.

PINCHEIRA, Miguel et al. Exploiting constrained IoT devices in a trustless Blockchain-based water management system. In: **2020 IEEE International Conference on Blockchain and Cryptocurrency (ICBC)**. IEEE, 2020. p. 1-7.

PINHEIRO, Marcus Vinícius Chiulle. **Sistemas de apoio à decisão e gestão de recursos hídricos**: proposta de um modelo conceitual. 2022.

PIOVESAN, Armando; TEMPORINI, Edméa Rita. Pesquisa exploratória: procedimento metodológico para o estudo de fatores humanos no campo da saúde pública. **Revista de saúde pública**, v. 29, p. 318-325, 1995.

PIRES, J. S. R; SANTOS, J. E; DEL PRETTE, M. E. A utilização do conceito de Bacia Hidrográfica para a conservação dos recursos naturais. In: **Conceitos de Bacias Hidrográficas. Teorias e Aplicações**. Ilhéus: Editus, 2005

PIZELLA, Denise Gallo. A relação entre Planos Diretores Municipais e Planos de Bacias Hidrográficas na gestão hídrica. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, p. 635-645, 2015.

PIZELLA, Denise Gallo; SOUZA, Marcelo Pereira de. Avaliação ambiental estratégica de planos de bacias hidrográficas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, p. 243-252, 2013.

POMPÊO, Marcelo; MOSCHINI-CARLOS, Viviane. Avaliação da degradação da qualidade da água do reservatório Carlos Botelho em Itirapina, São Paulo, Brasil, por meio de imagens do satélite Sentinel 2. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 27, n. 2, p. 279-290, 2022.

PORTO, Monica FA; PORTO, Rubem La Laina. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, p. 43-60, 2008.

PORTO, RLL, AZEVEDO, LGT. Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos. In: Porto RLL, Org. **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS: ABRH; 1997. p. 43–95

POWER, D. J. Decision support systems: concepts and resources. **Quorum: Westport**, 2002.

PRASAD, D.; RATNA, S. Decision support systems in the metal casting industry: An academic review of research articles. **Materials Today: Proceedings**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 1298–1312, 2018.

PRATES, Dayane Cristina da Silva. **Auditoria de Gestão na avaliação da execução das ações do plano de bacia hidrográfica: uma proposta metodológica para o Plano de Bacia Hidrográfica do Pontal do Paranapanema-São Paulo/Brasil**. 2021.

QUINTELLA, Rogério Hermida; SOARES JUNIOR, Jair Sampaio. Sistemas de apoio à decisão e descoberta de conhecimento em bases de dados: uma aplicação potencial em políticas públicas. **Organizações & Sociedade**, v. 10, p. 83-98, 2003.

RODRIGUES, L. N.; SILVA, L. M. C.; FREITAS, M.S. Reservação: planejamento e gerenciamento da água com vistas à redução de conflitos. **Embrapa Cerrados**, n.98, p.34-38, 2014.

ROSA, Alexsandra Matilde Resende; GUARDA, Vera Lúcia de Miranda. **Gestão de recursos hídricos no Brasil: um histórico**. 2019.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches; DEL PRETTE, Marcos Estevan. Recursos hídricos e as bacias hidrográficas: âncoras do planejamento e gestão ambiental. **Revista do departamento de geografia**, v. 12, p. 89-121, 1998.

RUIZ, J. Zamorano. Comparativa y análisis de algoritmos de aprendizaje automático para la predicción del tipo predominante de cubierta arbórea. **máster en ingeniería en informática, Universidad Complutense de Madrid**, 2018.

SAGNE, Dipika; PANDHARE, Rashmi A. Performance Analysis of a Compact Conformal SWB Antenna for 5G and Wearable IoT Applications. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 23, n. 2, p. e2024278747, 2024.

SILVA, Fabio Leandro da et al. Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1626-1653, 2021.

DA SILVA, Luiz Ricardo Mantovani. Aplicação de Inteligência Artificial na Predição e Monitoramento da Qualidade da Água em Bacias Hidrográficas. **Environmental Science & Technology Innovation-ISSN 2965-1158**, v. 2, n. 2, 2023.

SILVA, Maria Luiza Ramos; FALSARELLA, Orandi; MARIOSIA, Duarcides Ferreira. O processo de decisão na gestão de recursos hídricos: a contribuição da Internet das Coisas (IOT) e Big Data. **Journal on Innovation and Sustainability RISUS**, v. 13, n. 2, p. 45-58, 2022.

SINGH, R. K. et al. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological Indicators**, v. 15, n. 1, 2012.

SMITH, M. et al. Water Quality Index Concept and Use. **Journal of the Water Pollution Control Federation**, [s.l.], v. 42, n. 10, p. 123-128, 1970.

SOBRINHO, Ranulfo Paiva et al. Tecnologia ‘blockchain’: Inovação Em Pagamentos Por Serviços Ambientais (PSA), 2019.

SOSA, Milton E.; ROMEO, Marcelo E.; SOSA, Eduardo O. Harnessing low-power IoT sensor potential: the synergy of LoRaWAN, energy harvesting and supercapacitors. **Revista de Ciencia y Tecnología**, n. 41, p. 6-6, 2024.

SOSA, Eduardo O.; SOSA, Milton E. Potenciando el Desarrollo de IoT con Tecnología LPWAN: Caso de Estudio en la Universidad Nacional de Misiones. **Revista de Ciencia y Tecnología**, n. 40, p. 7-7, 2023.

SOUZA FILHO, F. A. Recursos hídricos e agenda de tecnologias e inovação no Nordeste. **Parc. Estrat. Ed. Esp.**, v. 20, n. 41, p.149-174, 2015

SUGAHARA, Cibele Roberta et al. **Avaliação da Sustentabilidade das Bacias PCJ a partir de Indicadores de Disponibilidade e Demandas Hídricas**, 2020.

TARGA, M. S. Hidrologia e manejo de bacias hidrográficas. **Taubaté: UNITAU**, 2008. 61f. 1 Apostila.

TAURION, Cezar. Big data. **Brasport**, 2013.

TEODORO, Valter Luiz Iost et al. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Brasileira Multidisciplinar-ReBraM**, v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007.

TORI, Romero; KIRNER, Claudio; SISCOOTTO, Robson Augusto. Fundamentos e tecnologia de realidade virtual e aumentada. **Porto Alegre: Editora SBC**, 2006.

TURBAN, E.; RANIER JR., R. K.; POTTER, R. E. Introdução a sistemas de Informação uma abordagem gerencial. **Rio de Janeiro: Elsevier**, 2007.

VARGAS-CRISPIN, Wilber Samuel et al. Machine Learning como Herramienta para Determinar la Variación de los Recursos Hídricos. **Scientific Research Journal CIDI**, v. 1, n. 1, p. 56-69, 2021.

WATSON, I. Applying case-base reasoning: techniques for enterprise systems. **San Francisco: Morgan Kaufmann**, 1997

ZABADAL, Bernardo Moreira; DE CASTRO, Bianca Francinny Lisboa Murta. IoT e seus principais desafios. **Revista Interdisciplinar de Tecnologias e Educação**, v. 3, n. 1, 2017.

ZIMATH, Patrícia Mascarenhas Bonina et al. **Fatores Críticos de Sucesso na Implantação de Sistemas de Gestão Empresarial: estudo de caso na Datasul**. 2007.