



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MULTICAMPI APUCARANA E LONDRINA

PEDRO HENRIQUE GONGORA MIGUEZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA INTEGRAÇÃO E
DISPONIBILIZAÇÃO DE DADOS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

LONDRINA

2023

PEDRO HENRIQUE GONGORA MIGUEZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA INTEGRAÇÃO E
DISPONIBILIZAÇÃO DE DADOS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

**DEVELOPMENT OF A SYSTEM FOR INTEGRATION AND AVAILABILITY OF
GROUNDWATER DATA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental / multicampi Apucarana e Londrina da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Engenharia Ambiental

Linha de Pesquisa: Monitoramento Ambiental

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alessandra Furtado da Silva.
Coorientador: Prof. Dr. Alessandro Botelho Bovo.

LONDRINA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



PEDRO HENRIQUE GONGORA MIGUEZ

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA INTEGRAÇÃO E DISPONIBILIZAÇÃO DE DADOS DE
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 04 de Setembro de 2023

Dr. Alessandro Botelho Bovo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Jose Paulo Peccinini Pinese, Doutorado - Universidade Estadual de Londrina (UEL)

Dr. Mauricio Moreira Dos Santos, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 21/09/2023.

MIGUEZ, Pedro Henrique Gongora. **Desenvolvimento de um Sistema para Integração e Disponibilização de Dados de Águas Subterrâneas**. 2023. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2023.

RESUMO

As águas subterrâneas são de extrema importância para o abastecimento urbano no Brasil, devido à sua ampla disponibilidade e baixo custo de obtenção. Esses mananciais subterrâneos são amplamente utilizados como fonte primária em diversos municípios, assim como na produção agrícola e industrial. Desse modo, conhecer os parâmetros hidrogeológicos e hidroquímicos é essencial para um manejo sustentável para a exploração de aquíferos. Mesmo possuindo grande importância no aspecto socioeconômico e ambiental, existe pouco investimento para a disponibilização e integração desses dados. Os sistemas disponíveis para coleta e armazenamento desses parâmetros sofrem algumas limitações, especialmente envolvendo dados desatualizados, exportação limitada e uma quantidade restrita de análises e poços. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou integrar diferentes fontes de informações sobre águas subterrâneas, padronizando e unificando as informações em um banco de dados, contendo dados sobre poços do IAT (Instituto Água e Terra do Paraná), SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas) e RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas). Foram também desenvolvidas ferramentas para utilizar o banco de dados, incluindo um sistema de *Business Intelligence*, uma *Application Programming Interface* e um software para realizar diagramas de Piper e Stiff, balanço iônico e exportar esses dados. Foi realizado um estudo de caso para o estado Paraná com o objetivo de analisar os poços com níveis de nitrato próximos e acima do limite legal de potabilidade. Assim, foi possível identificar uma maior presença de contaminação por nitrato em poços urbanos, provavelmente devido à contaminação por efluentes advindos de vazamentos da rede de esgoto. O trabalho, portanto, demonstra o desenvolvimento de um sistema que pode auxiliar pesquisadores e tomadores de decisões a terem ferramentas que permitam um melhor entendimento das águas subterrâneas, com diagramas e a capacidade de processar grande quantidade de dados, permitindo a integração entre diferentes fontes de dados de águas subterrâneas.

Palavras-chave: Águas Subterrâneas; Monitoramento Ambiental; Integração de Dados; Disponibilização de Dados.

MIGUEZ, Pedro Henrique Gongora. **Development of a System for Integration and Availability of Groundwater Data**. 2023. 82p. Dissertation (Master in Environmental Engineering) – Federal University of Technology – Paraná, Londrina, 2023.

ABSTRACT

Groundwater is of crucial importance for urban supply in Brazil, owing to its wide availability and low procurement cost. These underground water sources are extensively used as the primary source in various municipalities, as well as in agricultural and industrial production. Understanding the hydrogeological parameters is vital for sustainable management of groundwater exploitation. Despite its extreme importance in the socio-economic and environmental aspect, there is little investment in making this data available. The systems developed for collecting and storing these parameters are often not made available to the public, and those that are suffer from limitations involving outdated data and limited exportation to a restricted quantity of analyses and wells. In this context, the present study aimed to integrate different sources of information on groundwater, centralizing wells data in a system from IAT (Instituto Água e Terra do Paraná), SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas), and RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas). Additionally, tools were developed to utilize the database, inclusive of a Business Intelligence system, an Application Programming Interface, and software to effectuate Piper and Stiff diagrams, ionic balance, and to export the aforementioned data. A case study was executed for the state of Paraná with the objective of analyzing wells with nitrate levels proximate to and exceeding the statutory limit of potability. Therefore, it was feasible to identify a more pronounced presence of nitrate contamination in urban wells, likely attributable to contamination from effluents resultant from sewage network leaks. Accordingly, the work demonstrates the development of a system capable of assisting researchers and decision-makers by providing tools which facilitate an enhanced understanding of groundwater, with diagrams and the capability to process a substantial volume of data, thereby enabling the integration amongst diverse sources of groundwater data.

Keywords: Groundwater; Environmental monitoring; Data Integration; Data Availability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Usos consuntivos setoriais de água no Brasil	15
Figura 2 – Estresse Hídrico Anual	17
Figura 3 – Rebaixamento do nível de água	18
Figura 4 – Concentração de nitrato nas águas subterrâneas em municípios de São Paulo	21
Figura 5 – Estrutura da governança de águas subterrâneas	25
Figura 6 – Área de abrangência do SIAGAS, RIMAS e IAT-PR	31
Figura 7 – Resumo da estrutura do trabalho.	32
Figura 8 – Exemplo de uma página de um poço do SIAGAS	34
Figura 9 – Trecho HTML da página do SIAGAS	35
Figura 10 – Exemplo das informações convertidas para JSON	36
Figura 11 – Processo de extração dos dados do SIAGAS e RIMAS	37
Figura 12 – Tratamento dos dados da base do IAT	38
Figura 13 – Exemplo dos dados de um poço em JSON	40
Figura 14 – Forma de organização das análises químicas	41
Figura 15 – Forma de organização dos dados construtivos	42
Figura 16 – Forma de organização dos dados geológicos	42
Figura 17 – Forma de organização dos dados hidrogeológicos	43
Figura 18 – Forma de organização dos Testes de Bombeamento	43
Figura 19 – Acesso de softwares de BI ao Banco de Dados	44
Figura 20 – Aba para coleta de poços do SIAGAS	47
Figura 21 – Aba para coleta de poços do RIMAS	48
Figura 22 – Aba para coleta de poços do IAT	49
Figura 23 – Edição de tabelas do IAT	50
Figura 24 – Parte do menu superior para visualização dos dados coletados	50
Figura 25 – Parte do menu superior para exportação dos dados e janela de configuração	51
Figura 26 – Aba de exportação dos poços	52
Figura 27 – Mapa de distribuição de poços coletados do SIAGAS E RIMAS	53
Figura 28 – Mapa de distribuição de poços coletados do IAT	54
Figura 29 – Power BI dos poços cadastrados no SIAGAS	55
Figura 30 – Menu principal do software	56

Figura 31 – Janela de pesquisa de poços do software.....	57
Figura 32 – Janela para seleção de atributos a importar.....	58
Figura 33 – Tela Inicial após carregamento dos dados	58
Figura 34 – Aba para configuração das análises químicas	59
Figura 35 – Aba do balanço iônico	61
Figura 36 – Aba lateral para visualização dos diagramas de <i>Piper</i> e <i>Stiff</i>	62
Figura 37 – Aba do diagrama de <i>Stiff</i>	63
Figura 38 – Aba do diagrama de <i>Piper</i>	64
Figura 39 – Website para visualizar os poços de forma individual ou em <i>clusters</i> ...	66
Figura 40 – Mapa da distribuição de poços com nitrato no Paraná.....	68
Figura 41 – Níveis de nitrato no Paraná e grupos de potabilidade	69
Figura 42 – Distribuição das análises de nitrato no uso do solo urbano e rural	70
Figura 43 – Níveis de nitrato no Paraná entre 1990 e 1999	71
Figura 44 – Níveis de nitrato no Paraná entre 2000 e 2009	71
Figura 45 – Níveis de nitrato no Paraná entre 2010 e 2020	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de poços coletadas por sistema	52
Tabela 2 – Fatores de conversão mapeados mg/l para mEq/l.....	59
Tabela 3 – Erro teórico permitido segundo Custódio e Lhamas (1983)	61
Tabela 4 – Classes de uso do solo	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
API	Interfaces de Programação de Aplicativos
BI	Inteligência de Negócios
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CMPR	Serviço Geológico do Brasil
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica – São Paulo
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FTP	Protocolo de Transferência de Arquivos
HTML	Linguagem de Marcação de HiperTexto
HTTP	Protocolo de Transferência de Hipertexto
IAT	Instituto Água e Terra – Paraná
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IMASUL	Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul
RIMAS	Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SQL	Linguagem de consulta estruturada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	14
2.1.1 Demanda mundial de água	14
2.1.2 Demanda das águas subterrâneas	15
2.1.3 Contaminação e poluição de águas subterrâneas	19
2.1.4 Monitoramento de águas subterrâneas	21
2.2 GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	23
2.2.1 Governança das Águas Subterrâneas no Brasil.....	26
2.2.2 A importância do monitoramento e disponibilização das informações	27
2.2.3 Problemas e desafios no monitoramento de águas subterrâneas.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1 OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	33
3.1.1 Armazenamento dos dados em JSON	33
3.1.2 Obtenção dos dados do SIAGAS e RIMAS.....	33
3.1.3 Obtenção dos dados do IAT	37
3.2 DESENVOLVIMENTO DO BANCO DE DADOS	38
3.2.1 MongoDB	39
3.2.2 Modelagem dos dados	40
3.3 DISPONIBILIZAÇÃO	43
3.3.1 Compatibilidade e utilização dos dados em plataformas BI	44
3.3.2 Acesso aos dados via <i>webservice RESTful</i>	45
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 PROGRAMA PARA OBTENÇÃO DOS DADOS	46
4.1.1 Coleta de Dados do SIAGAS	46
4.1.2 Coleta de Dados do RIMAS	47
4.1.3 Coleta de Dados do IAT	48
4.2 ENVIO PARA O BANCO DE DADOS	50

4.3 ANÁLISE DOS POÇOS EXPORTADOS PARA O BANCO DE DADOS	52
4.4 CONEXÃO DO BANCO DE DADOS COM O POWER BI.....	54
4.5 PROGRAMA PARA ANÁLISE DOS DADOS	55
4.5.1 Acesso da ferramenta ao Banco de Dados	56
4.5.2 Visualização e tratamento do dados	58
4.5.3 Balanço iônico	60
4.5.4 Diagramas de <i>Piper</i> e <i>Stiff</i>	62
4.6 API PARA VISUALIZAÇÃO DOS DADOS	64
4.6.1 Website de visualização dos poços.....	65
4.7 ESTUDO DE CASO: MONITORAMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE NITRATO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO PARANÁ	66
5 CONCLUSÃO	73
REFERÊNCIAS.....	75

1 INTRODUÇÃO

O desabastecimento de água no Brasil afetou 43 milhões de pessoas em 2018 e no ano seguinte cerca de 22 milhões, valor que representa 11 vezes o número de pessoas afetadas por eventos de cheias, como alagamentos e inundações no mesmo período. A utilização das águas subterrâneas oferece resiliência em eventos extremos, fazendo com que seu uso seja cada vez mais necessário para evitar a falta de água para a população (ANA, 2021).

Além disso, houve um grande avanço no manejo e monitoramento das águas subterrâneas devido a um maior interesse da sociedade, proporcionando assim, o surgimento de novas tecnologias para o monitoramento tanto em escala local quanto global. No entanto, apesar dos progressos, a principal dificuldade é obter informações atualizadas, precisas e com intervalos espaciais e temporais adequados, justamente pela falta de um sistema organizado de monitoramento e coleta de dados (LALL et al., 2020).

Em paralelo a esse desafio, é fundamental destacar que o acesso à informação e a transparência das políticas públicas são essenciais para a universalização e o aprimoramento da qualidade dos serviços de saneamento. No entanto, no Brasil existe uma precariedade histórica nessa área, tornando necessárias ações efetivas para gerar avanços e atender às demandas da população (FREITAS et al., 2018).

O monitoramento é uma das bases para o manejo sustentável das águas subterrâneas. As informações que devem ser coletadas incluem o nível estático, capacidade de extração e qualidade da água por meio de parâmetros hidroquímicos e biológicos. Monitorar a situação e o histórico das águas subterrâneas está fortemente ligada a uma rede de monitoramento atualizada e bem desenvolvida, sendo necessária uma plataforma que permita o monitoramento e coleta dos dados de forma eficiente (KARAR, 2017). Este trabalho objetiva, portanto, auxiliar em estudos relacionados com águas subterrâneas por meio do desenvolvimento de um sistema para coleta, agregação e disponibilização de dados sobre poços dentro do território nacional.

1.1 JUSTIFICATIVA

A realização de estudos sobre águas subterrâneas envolve diversas dificuldades para a obtenção, análise e coleta de dados. O monitoramento das águas subterrâneas é essencial para a gestão eficiente dos recursos hídricos, e para isso, é necessário o acesso às informações existentes. O SIAGAS contém informações sobre poços de todas as regiões do país, mas seu sistema limita a quantidade de poços e de dados que podem ser exportados. Dados existentes em órgãos públicos estaduais são muitas vezes de difícil obtenção ou não são disponibilizados.

Além das dificuldades para obtenção dos dados, existem problemas relacionados ao tratamento desses, como a falta de softwares especializados, poucas alternativas gratuitas e o alto custo dos softwares pagos nesta área. Assim, a área de softwares para análises hidrogeoquímicas e ferramentas voltadas para poços e águas subterrâneas necessita de novos produtos.

O desenvolvimento de um banco de dados que apresente maior desempenho e que seja menos limitado, somado a dados de fácil disponibilidade, permitirá contribuir com os estudos e pesquisas sobre o monitoramento de águas subterrâneas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver um ambiente computacional para auxiliar no gerenciamento e no monitoramento ambiental de águas subterrâneas. Isso será realizado por meio da coleta, armazenamento e da disponibilização de informações pertencentes a poços tubulares profundos cadastrados em sistemas de diferentes instituições públicas. Assim, as informações serão armazenadas em um banco de dados e disponibilizadas por meio de diversos softwares.

1.2.2 Objetivos específicos

- Unificar o processo de coleta dos dados de poços cadastrados no SIAGAS, RIMAS e IAT-PR em um software;
- Desenvolver um Banco de Dados em *MongoDB* para armazenar as informações dessas diferentes instituições e simplificar a utilização desses dados;
- Criar ferramentas analíticas e visuais para estudos hidroquímicos;
- Realizar a integração do Banco de Dados às aplicações, permitindo a busca por parâmetros geográficos, químicos e litológicos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

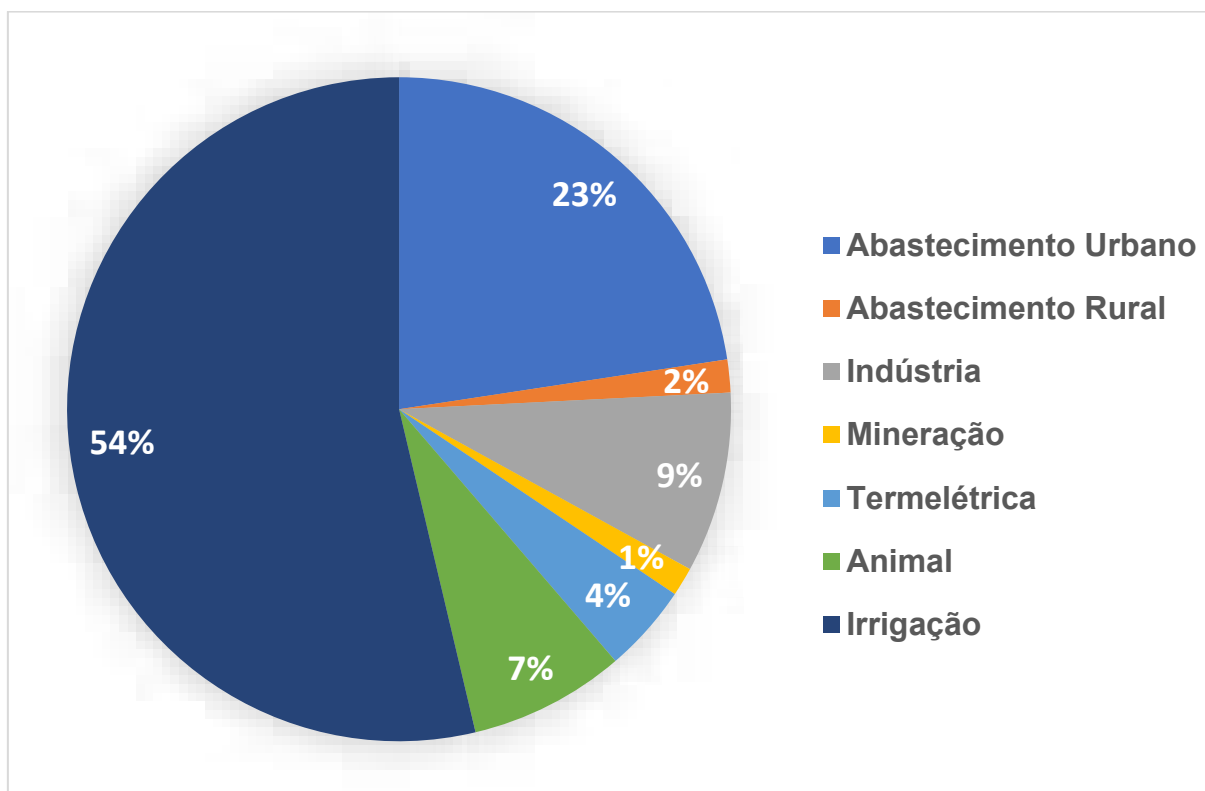
2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

2.1.1 Demanda mundial de água

A demanda por água no mundo vem crescendo constantemente a uma taxa de 1% ao ano desde 1980, sendo que o uso da água hoje é 6 vezes maior que 100 anos atrás (UNESCO, 2021). O aumento dessa demanda tem ocorrido principalmente nas economias emergentes e preocupa devido ao crescimento populacional, visto que a população mundial passou de 7,7 bilhões em 2019 e estima-se que alcance quase 10 bilhões em 2050 (United Nations, 2019).

Aproximadamente 4 mil quilômetros cúbicos de água são utilizados por ano no mundo. A agropecuária é o setor que tem a maior demanda, correspondendo a cerca de 7% do total de água utilizada. Essa porcentagem chega a 90% em países em desenvolvimento, enquanto nos países desenvolvidos é muito inferior, ficando próximo de 40% (FAO, 2011). O segundo setor que mais demanda água é o industrial, que utiliza cerca de 19%, sendo a China e os Estados Unidos os dois países com a maior quantidade de água utilizada para essa finalidade. Os restantes 12% são utilizados para abastecimento público de água (FAO, 2011; UNESCO, 2021).

No Brasil houve um crescimento de 80% no uso da água nas últimas duas décadas, seguindo assim a mesma tendência global de aumento. Dentro do cenário nacional são utilizados por ano mais de 67 quilômetros cúbicos de água. Conforme ilustrado na Figura 1, que mostra a distribuição do consumo de água por setor, a agropecuária é o maior consumidor, com um total de 61%, sendo que a maior parte dessa água é usada para irrigação (54%). Além disso, o abastecimento público é responsável por 25% (23% urbano e 2% rural) dessa demanda e o restante é dividido em 9% para o uso industrial, 4% para as termelétricas e 1% para a mineração (ANA, 2023; 2021).

Figura 1 – Usos consuntivos setoriais de água no Brasil

Fonte: (ANA, 2023)

Segundo a ANA (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico) (ANA, 2021), o crescimento do consumo de água constitui um dos principais desafios hídricos no Brasil, com previsão de um aumento de 42% até 2040. Tal aumento pode intensificar o estresse hídrico, especialmente nas regiões Sul e Sudeste, que são caracterizadas por alta densidade populacional e forte presença do setor agropecuário. Adicionalmente, a região Nordeste, afetada por constantes eventos de seca durante o período de 2017-2020, pode enfrentar agravamentos na disponibilidade hídrica em decorrência desse crescimento no consumo de água (ANA, 2023; 2021).

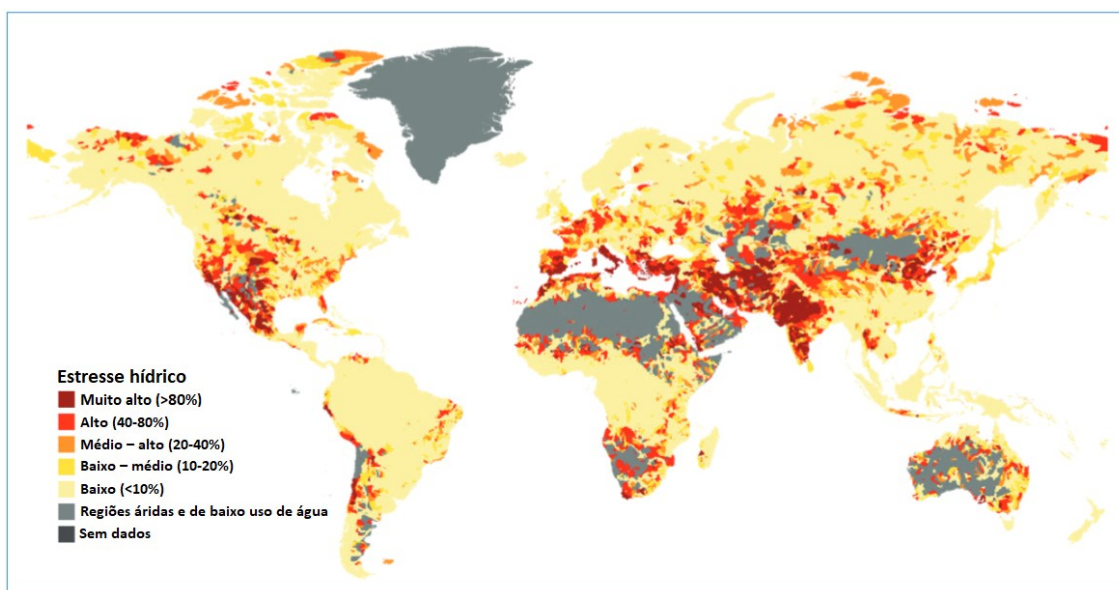
2.1.2 Demanda das águas subterrâneas

As águas subterrâneas são fundamentais para a sociedade, sendo a principal fonte de água para cerca de 2 bilhões de pessoas no mundo e contribuem com 42% da água utilizada na agropecuária, 36% no abastecimento público e 27% no uso industrial (DÖLL et al., 2012; RICHEY et al., 2015). Além de sua importância como

fonte primária, a água subterrânea é essencial para o ciclo hidrológico, mantendo os níveis dos mananciais superficiais elevados mesmo em épocas de baixa precipitação e é também uma alternativa de abastecimento público importante em períodos de seca, tendo em vista que o aquecimento global tem elevado a ocorrência desses períodos (FAMIGLIETTI, 2014).

Além disso, no Brasil são bombeados cerca de 17,5 quilômetros cúbicos de águas subterrâneas que contribuem para o abastecimento de diversos setores da sociedade. Segundo Hirata et al. (2019), dos poços cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), a maior parcela é utilizada para o abastecimento doméstico (30%), seguido pelo uso agropecuário (24%), abastecimento público urbano (18%) e uso múltiplo (14%). Porém, esses dados podem não refletir realmente o cenário brasileiro, pois a estimativa é que existam 2,6 milhões de poços no país e desses somente 326 mil estão cadastrados no SIAGAS (Hirata et al., 2019). Assim, é preciso melhorar a gestão do monitoramento das águas subterrâneas para ter um maior conhecimento da situação nacional, o que pode também auxiliar em políticas públicas para preservar essas águas (ANA, 2021).

O estresse hídrico, indicador que mede a relação entre captação e disponibilidade de água, reflete conflitos sociais quando a demanda supera a oferta. Altos níveis de estresse hídrico podem causar prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Globalmente, 2,3 bilhões de pessoas residem em países com estresse hídrico, com mais de 700 milhões em áreas de estresse alto ou crítico. A Figura 2 ilustra o nível de estresse hídrico em várias regiões do mundo (United Nations, 2018; 2021).

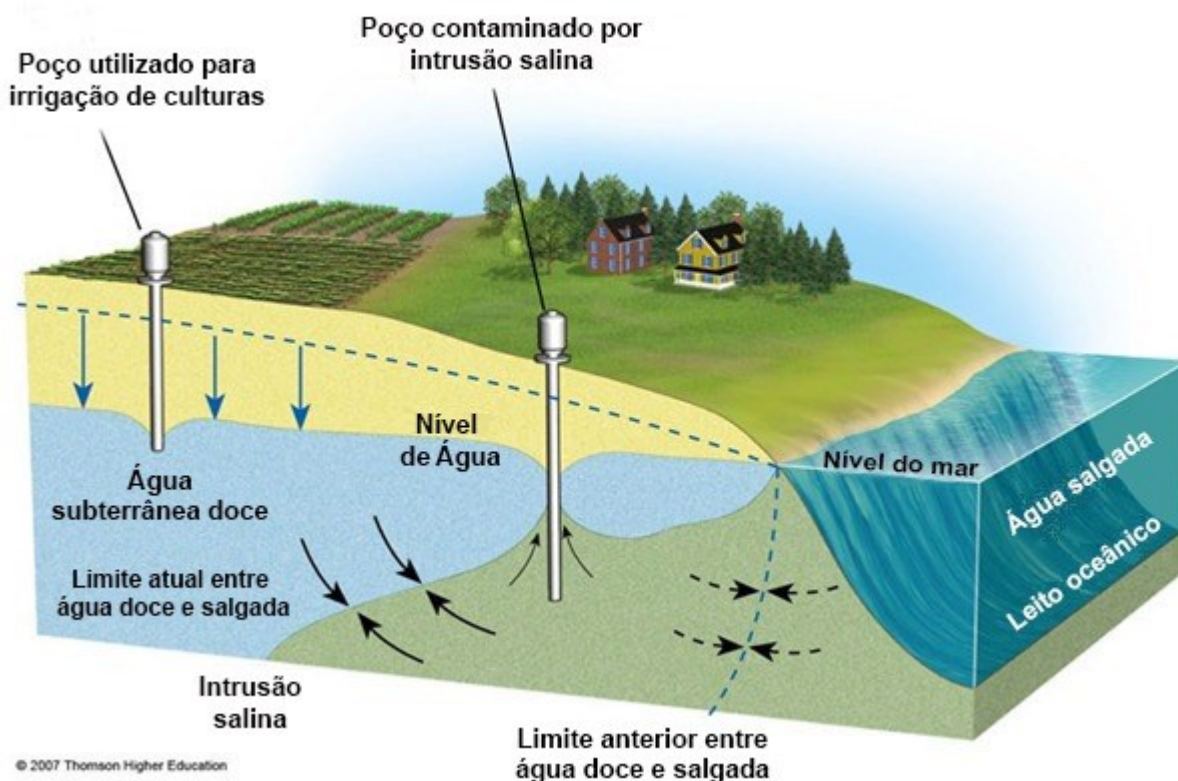
Figura 2 – Estresse Hídrico Anual

Fonte: (United Nations, 2021)

As águas subterrâneas tendem a sofrer altos estresses hídricos, uma vez que se trata de um recurso de difícil visualização e com um custo de captação acessível. A agricultura é a atividade que mais impacta essas águas, pois metade da água utilizada por esse setor é extraída através de poços. Esse cenário de exploração desenfreada dos aquíferos aliado a eventos de menor precipitação faz com que seja cada vez mais difícil preservar as águas subterrâneas. Assim, caso essa situação não seja revertida, as águas subterrâneas serão cada vez mais escassas para as futuras gerações (FAMIGLIETTI, 2014).

Nesse sentido, a exploração dos aquíferos acima de sua capacidade de recarga leva a um processo de decaimento do nível de água devido a uma grande quantidade de água retirada através de poços, o que piora a qualidade da água levando a problemas como intrusão salina, contaminação antrópica e de ocorrência natural. Assim, caso o cenário de exploração acima do limite de recarga não seja revertido, ecossistemas inteiros podem ser impactados devido à perda da potabilidade e à falta de água (JASECHKO; PERRONE, 2021; WIJNEN et al., 2012). Na Figura 3, por exemplo, é possível visualizar as consequências da exploração acima dos limites de recarga do aquífero, o que leva a intrusão salina devido ao rebaixamento hídrico, contaminando o poço próximo à região litorânea com a presença de sal.

Figura 3 – Rebaixamento do nível de água



Fonte: http://images.slideplayer.com/5/1591787/slides/slide_26.jpg

O rebaixamento de água é um fenômeno observável nos principais aquíferos globais, com decaimento detectado em mais da metade deles. Um exemplo notório é o *Central Valley* na Califórnia, que é a maior região produtora agrícola do mundo, onde o uso intensivo de água para irrigação está inutilizando os poços domésticos (FAMIGLIETTI e FERGUSON, 2021). Situações semelhantes ocorrem em outras partes do mundo, sobretudo na região da Ásia-Pacífico, que abriga 7 dos 15 maiores países consumidores de águas subterrâneas.

Essa tendência ao rebaixamento dos aquíferos pode levar a diversos problemas econômicos e sociais, haja vista que uma queda de apenas 5 metros no nível estático pode inutilizar de 6% a 20% dos poços globais. Esse cenário é agravado quando consideramos a agricultura de pequena escala, que, ao contrário dos grandes proprietários de terras, não possui os recursos necessários para investir em poços mais profundos. Essa situação pode intensificar o êxodo rural e ampliar a desigualdade social (JASECHKO e PERRONE, 2021).

No contexto brasileiro, alguns aquíferos apresentam sinais de decaimento no nível de água. O Sistema Aquífero Urucuia, situado na região Nordeste, tem registrado

rebaixamento de 6,5 milímetros anuais, mesmo com precipitação dentro da média. A irrigação intensiva nas culturas agrícolas é apontada como um dos principais fatores para esse decaimento (GONÇALVES et al., 2020).

Outro aquífero afetado é o aquífero Bauru, crucial para o abastecimento urbano, agricultura e indústria no estado de São Paulo, está enfrentando problemas de rebaixamento. A exploração desse aquífero tem sido maior que sua capacidade de recarga, e em cidades como São José do Rio Preto, observou-se uma queda de 10 metros na região central da cidade (LOURENCETTI et al., 2020).

2.1.3 Contaminação e poluição de águas subterrâneas

A EPA (*U.S. Environmental Protection Agency*) define o conceito de contaminação no documento *Safe Drinking Water Act* (SDWA) como: “qualquer substância de natureza física, química, biológica ou radioativa presente na água”. Assim, é esperado que existam contaminantes na água, porém pode se tornar perigosos quando estão em níveis elevados (EPA, 2021).

Os contaminantes podem ser de origem natural ou antrópica, podendo ser compostos químicos, como arsênio, nitrato e sódio, ou contaminantes biológicos como patógenos, além de contaminantes físicos, como alterações na temperatura da água por fatores externos. Esses contaminantes podem afetar as águas subterrâneas causando impactos tanto na sua potabilidade quanto em todo ecossistema ao redor. Dentre os principais contaminantes podemos citar: fluoretos, nitratos, arsênio, selênio e compostos radioativos como urânio. Existem também as bactérias decorrentes da contaminação por efluentes e compostos orgânicos como pesticidas e fertilizantes (WHO, 2006).

A poluição, por outro lado, é definida pelo SDWA (1996) como: “Alteração realizada ou induzida pelo ser humano dos parâmetros, físicos, químicos, biológicos ou radioativos da água”. A poluição ocorre quando os contaminantes são despejados no solo e são percolados pelas águas subterrâneas. Isso ocorre por meio de fontes como por exemplo: despejo e aplicação de pesticidas, lixões e tanques subterrâneos (WHO, 2006). A poluição pode ocorrer também devido a ações humanas no aquífero, como o super bombeamento das águas, levando ao aumento de compostos que estão presentes naturalmente na água, como o arsênio, a níveis nocivos à saúde humana (GARTHWAITE, 2018).

Para entender sobre a origem da poluição das águas subterrâneas podemos separar a poluição em duas classes: geogênica e antropogênica. A poluição geogênica tem origem natural, vindo da própria litologia do aquífero, e ocorre em diversas regiões do globo, inclusive na América do Sul (LI et al., 2021). No entanto, a região que mais preocupa é a Ásia, altamente dependente de águas subterrâneas e lar de mais da metade da população mundial. Esse continente apresenta sérios problemas de poluição geogênica devido à alta presença de fluoreto e arsênio nos aquíferos (LALL; JOSSET; RUSSO, 2020). Isso coloca em risco a população local que pode sofrer de doenças ósseas devido ao excesso de fluoretos e intoxicação por arsênio, que leva a problemas de pele, neurológicos e diversos tipos de câncer (WORLD HEALTH ORGANISATION, 2017).

No caso da poluição antropogênica, ela é causada pela ação humana, sendo o nitrato o contaminante de maior destaque, ocasionado pelo uso exagerado de fertilizantes e pelos efluentes e resíduos urbanos como aterros, despejo de esgoto etc. (LALL; JOSSET; RUSSO, 2020). O nitrato pode permanecer por séculos nas águas subterrâneas e em quantidades elevadas pode causar problemas sanguíneos e de tireoide, principalmente em faixas etárias mais suscetíveis como crianças e recém-nascidos. (WHO, 2017).

Um fator preocupante em relação à contaminação das águas subterrâneas é a dificuldade de detectá-la visualmente, já que geralmente é incolor e inodora. Entretanto, os impactos causados costumam ser dificilmente revertidos pois a remediação de águas subterrâneas é extremamente custosa e de grande complexidade. Além disso, o processo natural de remediação é muito mais lento em águas subterrâneas do que em águas superficiais, podendo demorar décadas ou até mesmo centenas de anos (LI et al., 2021).

No Brasil, mesmo sem a existência de trabalhos sistematizados em escala nacional, observou-se que os principais contaminantes são: nitrato, derivados de petróleo, metais pesados e contaminantes biológicos (ANA, 2017). A contaminação por nitrato é o que mais preocupa, pois essa contaminação ocorre em todas as regiões do país, sendo observada em diversos graus em regiões urbanas e rurais devido à falta de esgotamento sanitário e o uso inadequado de fertilizantes (CTAS/CRH, 2019).

O monitoramento das águas subterrâneas ainda é incipiente no Brasil, com uma quantidade insuficiente de poços de monitoramento para todos os aquíferos e estados brasileiros (ANA, 2021, 2017). No estado de São Paulo, que possui uma rede

de monitoramento de águas subterrâneas, a contaminação por nitrato é preocupante, sendo observado um aumento sistemático das concentrações nas últimas décadas com diversos pontos acima do limite permitido pela legislação (CTAS/CRH, 2019). O limite de potabilidade é de $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$, conforme Portaria N° 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde. Na Figura 4 é possível ver a escala da contaminação por nitrato, que atinge cidade espalhadas por todo o estado de São Paulo, principalmente no aquífero Bauru.

Figura 4 – Concentração de nitrato nas águas subterrâneas em municípios de São Paulo



Fonte: (CTAS/CRH, 2019)

2.1.4 Monitoramento de águas subterrâneas

O monitoramento das águas subterrâneas é de grande importância no acompanhamento de eventos nocivos, como o rebaixamento das águas e poluição. Este monitoramento serve também para a coleta de dados históricos, que podem registrar o passado dos aquíferos e indicar tendências futuras por meio de modelagens e extrapolações (RAU et al., 2020). Tradicionalmente, os níveis de águas subterrâneas eram medidos manualmente, o que trazia imprecisão e um grande intervalo temporal entre as medições, de semanas e até mesmo meses. Com o avanço da tecnologia, principalmente depois de 1980, a coleta automática de dados se tornou cada vez mais comum, possibilitando a observação da variação diária. E com o maior poder de processamento e a popularização da internet, os dados sobre águas subterrâneas podem ser disponibilizados ao público, sendo que diversos países têm seus sistemas nacionais, inclusive com sistemas globais de informações de águas subterrâneas, como o GGMN (*Global Groundwater Monitoring Network*) da *International Groundwater Resources Assessment Centre* (IGRAC) (ECE, 2012; IGRAC, 2021).

Para o monitoramento das águas subterrâneas é importante conhecer a quantidade e a qualidade da água. O monitoramento da quantidade é realizado por meio de medidas locais de variação do nível estático, existindo também ferramentas como o satélite GRACE, que demonstra as variações de massa d'água e é uma importante ferramenta no estudo de grandes regiões. Para a qualidade das águas subterrâneas são utilizados indicadores como: pH, alcalinidade, carbonatos e bicarbonatos, turbidez, condutividade e oxigênio dissolvido. Esses indicadores determinam as condições hidro químicas e a qualidade geral das águas. Além disso, informam sobre a característica do aquífero como, por exemplo, o oxigênio dissolvido e o pH, que são importantes indicadores das reações químicas que ocorrem nas águas (ARNOLD et al., 2017).

No Brasil o monitoramento das águas subterrâneas ainda é muito incipiente, possuindo apenas 409 poços de monitoramento para o território nacional na Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS) do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) (ANA, 2021). Outra fonte importante de informações é o Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). O sistema CPRM agrega informações sobre poços perfurados e são armazenadas informações como seu uso, perfil construtivo, litológico e qualidade da água, entre outras informações (ANA, 2021; FREDDO, 2020).

Sistemas como o SIAGAS são importantes ferramentas para fornecer dados sobre a situação e uso das águas subterrâneas a pesquisadores, gerentes e tomadores de decisões, servindo assim de base de apoio a gestão e governança de águas subterrâneas (FREDDO, 2020).

Existem também redes estaduais para o monitoramento da qualidade e nível de águas subterrâneas. Pode-se citar estados como Minas Gerais, com uma rede de poços monitorada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) (IGAM, 2018); Mato Grosso do Sul, que apresenta a rede do Instituto de Meio Ambiente de Mato Grosso do Sul (IMASUL) (SILVA; SANTOS; NEUMANN, 2021); e São Paulo, com uma rede de 316 poços da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), onde são analisados parâmetros de qualidade da água subterrânea como, por exemplo, a concentração de nitrato. Existe ainda no estado de São Paulo uma rede compartilhada com o Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) para monitoramento de nível estático, com um total de 64 pontos (CETESB, 2020).

2.2 GOVERNANÇA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A dependência da sociedade pelas águas subterrâneas está cada vez maior, pois essa é a base do aumento da produção agrícola e uma fonte constante de água potável para populações urbanas e rurais. As águas subterrâneas, mesmo sendo um recurso estratégico, estão cada vez mais ameaçadas por poluição e superexploração, sendo necessário um mecanismo que reverta essas tendências negativas e permita que um recurso tão importante como a água perdure pelas próximas gerações. Assim, a governança das águas subterrâneas é essencial para preservar esse recurso (FAO, 2016).

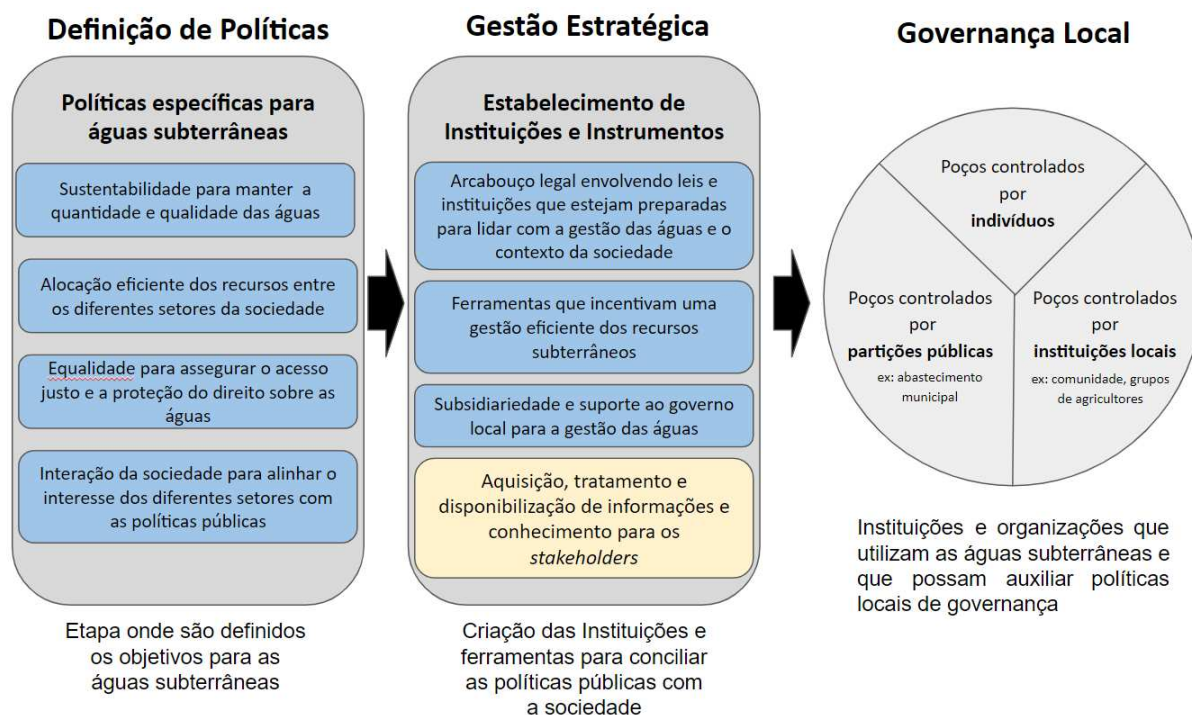
Segundo a FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) (FAO, 2016), o termo “*governança das águas subterrâneas*” pode ser definido como a realização de ações que garantam a exploração sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, mantendo o equilíbrio entre a manutenção dos recursos hídricos e o desenvolvimento da sociedade, sendo para isso necessária uma estrutura com princípios e membros capacitados. No mundo, a situação da governança depende da situação econômica do país, enquanto em países desenvolvidos a governança está estabelecida, com princípios que acompanham as demandas da sociedade, em países em desenvolvimento, os governos

frequentemente não conseguem acompanhar a constante evolução da sociedade, fazendo com que a governança esteja basicamente ausente em grande parte do mundo (FAO, 2016; GEF, 2015).

Para construir uma governança efetiva é necessário conhecer a situação da região, principalmente pela dificuldade de reduzir a extração de águas subterrâneas ou cobrar pelo uso depois que a sociedade já se acostumou com a falta de fiscalização. Esse é um problema principalmente em países que incentivaram a agricultura sem levar em conta a preservação das águas subterrâneas. Outro fator que prejudica a governança é o fato desse tema não estar na agenda política devido à maior parte da sociedade não se preocupar com o tema por não entender o conceito de águas subterrâneas (WIJNEN et al., 2012).

É importante entender como funciona a *estrutura da governança* (do inglês *Governance Framework*) para compreender a governança das águas. A Figura 5 demonstra como funciona essa estrutura, podendo ser separada em três níveis: definição de políticas, gestão estratégica e governança local. No nível de definição de políticas, a nação estabelece seus objetivos para as águas subterrâneas. No nível de estrutura da governança são criadas instituições e instrumentos para executar esses objetivos junto à sociedade, monitorando sua implementação. No nível de governança local estão as organizações e usuários de águas subterrâneas e onde a sociedade atende às políticas e incentivos instaurados. Nesse nível a utilização das águas subterrâneas ocorre de acordo com as ações estratégicas delimitadas pelos dois níveis anteriores.

Figura 5 – Estrutura da governança de águas subterrâneas.



Fonte: adaptado de (Wijnen et al., 2012)

A gestão estratégica, conforme a definição de (Wijnen et al., 2012), é parte essencial da governança, sendo seus principais atributos:

- Uma gestão integrada de recursos hídricos capaz de equilibrar a disponibilização da água de acordo com a demanda da sociedade e as metas ambientais;
- Um arcabouço legal, incluindo legislações, órgãos controladores e ferramentas para controle sobre os direitos de uso;
- Incentivar financeiramente um manejo correto das águas subterrâneas, por meio de subsídios e outros benefícios;
- Uma estrutura organizacional que seja inclusiva com medidas locais de manejo das águas subterrâneas;
- O monitoramento e disponibilização de informações sobre águas subterrâneas, levando conhecimento a toda sociedade.

Dentre os atributos citados anteriormente, um de grande importância é o monitoramento das águas subterrâneas, foco do trabalho aqui descrito (visível em

amarelo na Figura 5). Por meio do monitoramento contínuo das águas subterrâneas é possível observar e prevenir eventos de poluição e superexploração dos aquíferos, assim como avaliar a efetividade de políticas públicas (WIJNEN et al., 2012).

2.2.1 Governança das Águas Subterrâneas no Brasil

O modelo de gestão hídrica brasileira vem sendo implementado desde a década de 1930, com a criação do Código de Águas em 1934, que introduziu os domínios dos recursos hídricos e a relação público-privada (FARIAS et al., 2018). Essa lei introduziu conceitos como o de poluidor-pagador, em uma época em que a poluição era negligenciada pela maioria da população. Porém, foi a partir da década de 80 que a estrutura atual de governança começou a tomar forma, por meio da Constituição federal de 1988, e pela instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) em 1997 pela Lei das Águas (Lei 9.433/97), que reconheceu a água como um recurso hídrico limitado e de bem público (FARIAS et al., 2018; MESQUITA, 2018).

A Lei das Águas trouxe a descentralização da gestão dos recursos hídricos, criando o PNRH e o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). O SINGREH é composto por um conjunto de órgãos e colegiados responsáveis por coordenar a gestão integrada das águas; remediar conflitos sobre recursos hídricos; e planejar e monitorar o uso e a recuperação dos recursos hídricos (MESQUITA, 2018).

Em 2000 foi criada a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que é a entidade responsável por implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos e coordenar o SINGREH. A ANA também é responsável pelas outorgas e fiscalizações de recursos hídricos sob domínio da união, que são aqueles que estão localizados em mais de um estado ou fazem parte de território estrangeiro (FARIAS et al., 2018).

A criação dos comitês de bacias hidrográficas (CBH), entes pertencentes ao SINGREH, aumentou a participação da sociedade na gestão das águas. Porém, em relação às águas subterrâneas, ainda são raras as discussões, principalmente devido à falta de conhecimento dos processos hidrogeológicos e ao déficit de gerenciamento das águas subterrâneas (CONICELLI; HIRATA, 2017). Além disso, as águas

subterrâneas não seguem os limites das bacias hidrográficas e se estendem por vários estados, o que não é levado em conta pela atual governança onde os estados são os responsáveis pela gestão e proteção das águas subterrâneas (GRANZIERA; GRANZIERA, 2015).

A outorga das águas subterrâneas é um processo muito deficitário no Brasil. A maior parcela dos poços está irregular, com apenas uma pequena parcela outorgada. O processo de outorga ocorre sem a integração entre os estados e é tratado mais como um processo documentativo do que para controle das condições reais do aquífero (CONICELLI; HIRATA, 2017; HAGER et al., 2002).

2.2.2 A importância do monitoramento e disponibilização das informações

Um dos primeiros passos para o estabelecimento de uma governança efetiva das águas subterrâneas é estabelecer uma rede de monitoramento ampla e que contenha dados de qualidade e quantidade (WIJNEN et al., 2012).

A informação, o conhecimento e a disponibilização de informações são componentes essenciais para uma governança efetiva. Sem informação e conhecimento fica inviável a gestão das águas subterrâneas, e a comunicação é a base para que a sociedade entenda o seu papel. Dados socioeconômicos e ecológicos, assim como informações sobre qualidade, quantidade, recarga e uso das águas devem estar à disposição do público e da população em geral (FAO, 2016; WIJNEN et al., 2012).

O avanço tecnológico das últimas décadas propiciou o surgimento de várias ferramentas para a obtenção e disponibilização dessas informações. Na obtenção de dados, o surgimento de sensores automáticos permitiu que informações dinâmicas sejam obtidas em tempo real e em uma escala que seria impraticável se ocorresse de forma manual (FAO, 2016). Já na disponibilização dessas informações, a popularização da internet permite que qualquer profissional tenha acesso a essas informações, independentemente de onde estejam localizadas. Além disso, a internet abre caminho para a distribuição de ferramentas e plataformas que melhorem o entendimento da sociedade sobre a dinâmica e funcionamento das águas subterrâneas (BALDWIN et al., 2012).

Pode-se separar o tipo de informação em estática e dinâmica. Informações estáticas são dados imutáveis, ou pouco mutáveis, como, por exemplo, a litologia dos aquíferos. Normalmente esses dados são obtidos por meio de estudos geológicos em campo. No caso das informações dinâmicas, trata-se de séries temporais obtidas por meio do monitoramento constante como, por exemplo, nível, qualidade e recarga de águas, quantidade de água bombeada; e questões demográficas, como o perfil da população, renda, entre outros (FAO, 2016).

A forma mais efetiva de disponibilização muda conforme o tipo de informação. Os dados estáticos podem ser apresentados em forma de relatórios, mapas e documentos. Já dados dinâmicos podem ser disponibilizados por meio de banco de dados abertos, portais e repositórios (FAO, 2016).

Para que a governança efetiva ocorra além do acesso aos dados é necessário que as instituições e profissionais convertam a informação em conhecimento, pois por meio desse conhecimento os governantes e a sociedade podem tomar decisões fundamentadas. Assim, o compartilhamento de informações deve ocorrer de forma clara e ampla, sendo disponibilizado para a população não somente os dados, mas a interpretação e análises, utilizando as mídias de divulgação em massa como websites, portais e meios de comunicações, como rádio e TV (THE GROUNDWATER PROJECT, 2022).

2.2.3 Problemas e desafios no monitoramento de águas subterrâneas

As águas subterrâneas ainda sofrem com um monitoramento deficitário e mesmo com o investimento em novos poços de monitoramento, a cobertura atual ainda é limitada. Para efeito de comparação, enquanto a rede RIMAS do CPRM contém apenas 448 poços para o monitoramento constante das águas subterrâneas, a ANA contém 2.024 estações fluviométricas para o monitoramento dos rios (ANA, 2021).

Além da quantidade insuficiente de poços de monitoramento pertencentes à rede RIMAS, o investimento atual é insuficiente para garantir a meta de ampliação de 70 poços por ano. A redução orçamentária também traz prejuízo à manutenção do RIMAS devido à diminuição no número de visitas às estações. Sem as visitas, a

manutenção de equipamentos e limpeza dos poços (sujeira, raízes de plantas) deixam de ocorrer, comprometendo a série de dados históricos (GENARO, 2020).

Um problema frequente nos sistemas que armazenam dados sobre poços instalados é que esses podem não revelar informações mais detalhadas sobre o uso dos aquíferos, pois a maior parcela dos poços não é registrada (CONICELLI; HIRATA, 2017). O SIAGAS, como explicado anteriormente, contém cerca de 350 mil poços de um total de 2,6 milhões de poços em território nacional, devido a grande quantidade de poços irregulares. Esse problema é recorrente em todo território nacional, mesmo em metrópoles como Brasília e São Paulo. Essa grande quantidade de poços não mapeados traz uma série de problemas, pois a falta de cadastro e a consequente falta de fiscalização causa o desconhecimento da quantidade de água extraída dos aquíferos e poços mal construídos podem levar à poluição das águas subterrâneas (ANA, 2021; CONICELLI; HIRATA, 2017).

Outro problema recorrente em estudos ambientais é o compartilhamento dos dados que atualmente são disponibilizados e publicados com metadados em formato de arquivos. É necessária uma síntese dos dados para a utilização em estudos, identificando-os e reestruturando-os, sendo o Banco de Dados uma alternativa para melhorar a disponibilização, onde se obtém o dado já estruturado (WANG et al., 2020). Outra forma de disponibilização é por meio de ferramentas visuais, como portais SIG (Sistema de Informação Geográfica), que permitem um melhor entendimento, inclusive daqueles que não tem familiaridade com a área de estudo (BALDWIN et al., 2012).

Buscando facilitar o acesso a dados ambientais, algumas alternativas têm sido desenvolvidas, como o CABra (*Catchments Attributes for Brazil*), que disponibiliza diversos parâmetros hidrológicos: clima, geologia, topografia e uso do solo. Esses parâmetros são disponibilizados em conjunto por bacia, reduzindo o tempo que um pesquisador levaria para a coleta desses dados em outras plataformas (ALMAGRO et al., 2021).

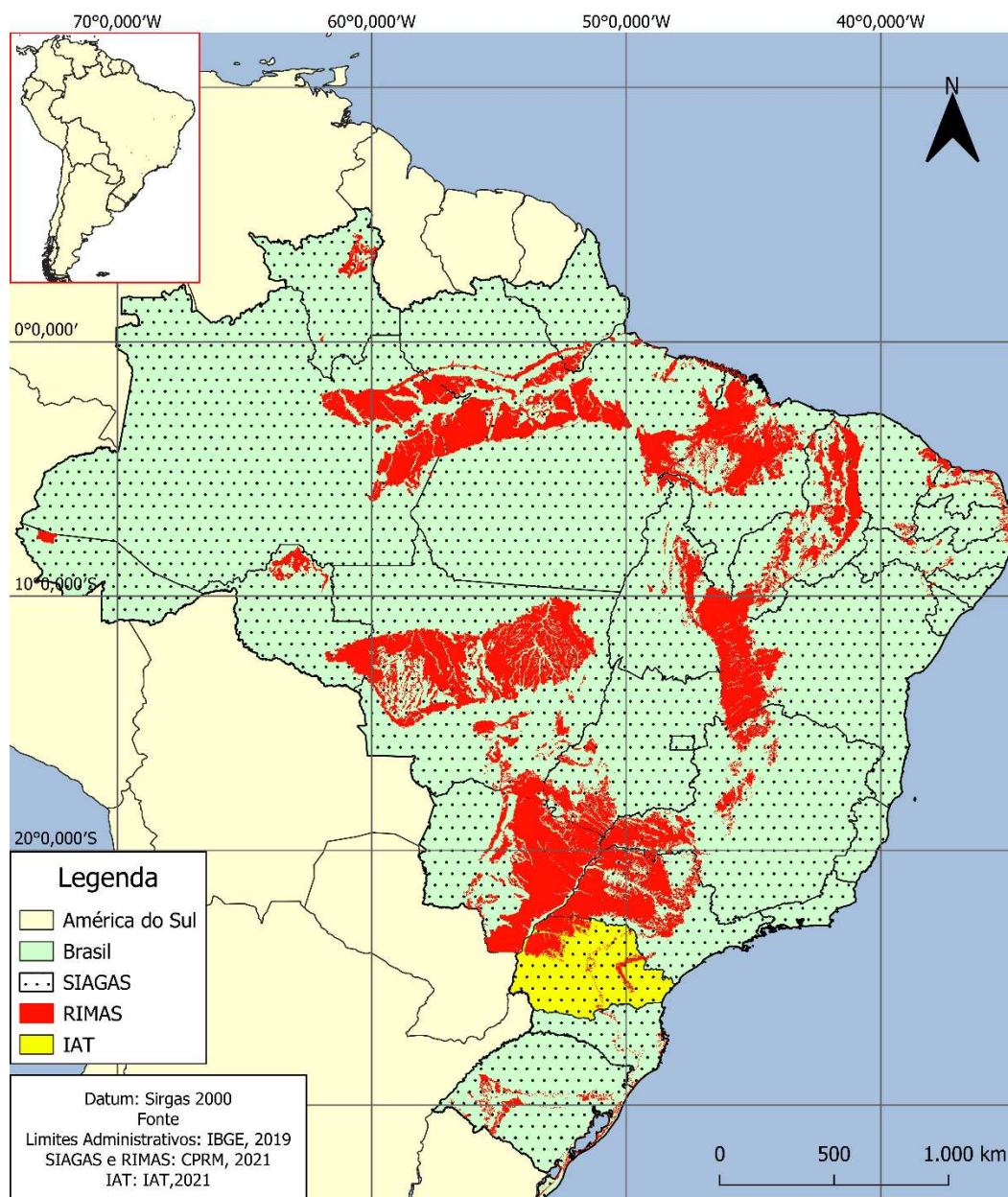
3 MATERIAL E MÉTODOS

Os sistemas disponíveis para consultar informações sobre águas subterrâneas agregam dados de poços em uma ampla extensão territorial, porém possuem algumas fragilidades. Um exemplo é a ausência de políticas públicas voltadas à gestão de águas subterrâneas, fator que leva à maior parte dos poços no Brasil não serem mapeados. Além disso, existe uma quantidade insuficiente de poços de monitoramento para uma gestão efetiva dos aquíferos brasileiros. Outro problema é a disponibilização desses dados por alguns órgãos públicos, como o SIAGAS e RIMAS, que limitam a mil poços sua exportação e não permitem também exportar alguns dados, como análises hidroquímicas, perfil construtivo e litológico.

Outras fontes importantes de dados que possuem problemas na disponibilização são as dos órgãos públicos estaduais, como o IAT-PR. Essa autarquia contém informações sobre os poços que estão presentes no estado do Paraná, porém sua disponibilização por *File Transfer Protocol* (FTP) e a organização dos arquivos dificulta a análise desses dados, principalmente para pesquisadores que não estão habituados a trabalharem com essas ferramentas.

Assim, com o objetivo de facilitar a disponibilização das informações sobre águas subterrâneas, este trabalho visou desenvolver um sistema para facilitar a obtenção e a análise desses dados. Nesse contexto, foram empregados dados provenientes de três fontes distintas: em âmbito nacional, o SIAGAS e RIMAS, e em escala estadual, o Instituto Água e Terra do Paraná (IAT-PR). A área de abrangência desses institutos é ilustrada na Figura 6.

Figura 6 – Área de abrangência do SIAGAS, RIMAS e IAT-PR.



Fonte: O autor (2023).

O projeto ocorreu em três etapas: coleta e tratamento dos dados, criação de um Banco de Dados e o desenvolvimento de ferramentas para analisar informações sobre águas subterrâneas. Na primeira etapa foi realizada a coleta dos dados, como por exemplo, a composição hidroquímica, perfil construtivo e geográfico. Foram escolhidos dois sistemas em escala nacional, SIAGAS e RIMAS, ambos do CPRM, devido à importância desses como os principais sistemas de informações sobre águas subterrâneas do Brasil. Foram coletados também dados do IAT-PR, como fonte

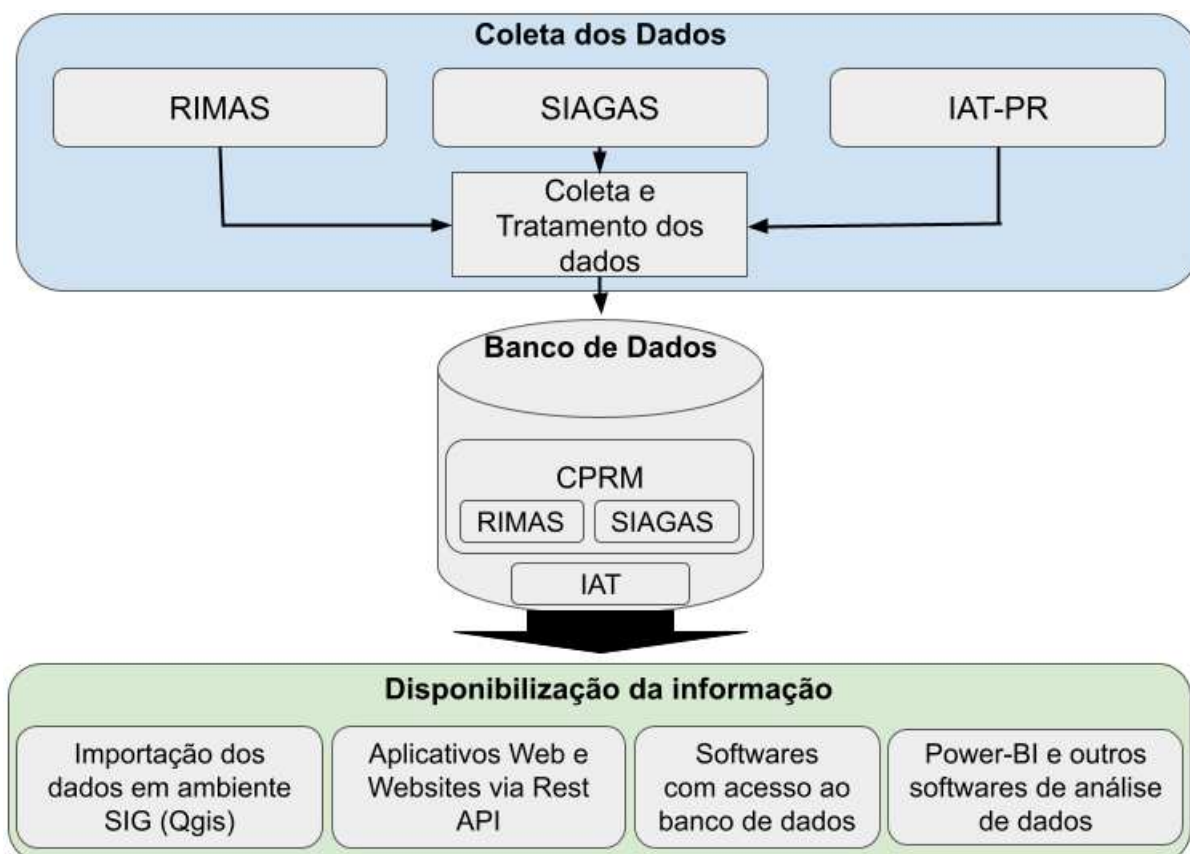
estadual de dados para aumentar a abrangência de informações no Paraná, sendo possível futuramente adicionar fontes de outros estados.

Na segunda etapa, para facilitar o acesso às informações de águas subterrâneas foi desenvolvido um Banco de Dados em *MongoDB* que pode ser acessado de diversas formas, como via *web services* e e por meio de softwares de *Business Intelligence* (BI) . Esse banco agrega informações vindas do SIAGAS, RIMAS e IAT. Isso facilitará o acesso dos pesquisadores a essas informações por meio da unificação desses dados de diferentes fontes e na sua exportação em um modelo padronizado.

Na terceira etapa, o projeto concentrou-se no desenvolvimento de soluções que utilizam e disponibilizam as informações contidas no Banco de Dados. Esse esforço envolveu a criação de software para acessar e realizar diagramas e balanço iônico e uma API (*Application Programming Interface*), além da incorporação de ferramentas como o PowerBI que pode ser integrado ao Banco de Dados.

Um fluxograma explicando a estrutura e as fases de desenvolvimento do projeto pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Resumo da estrutura do trabalho.



Fonte: O autor (2023).

3.1 OBTENÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

Inicialmente foram coletados dados de poços de águas subterrâneas do SIAGAS, RIMAS e IAT-PR. Os dados coletados foram organizados de forma a compatibilizar diferentes fontes, inclusive de futuras adições, como outros órgãos estaduais.

3.1.1 Armazenamento dos dados em JSON

Após a coleta e tratamento dos dados, optou-se por armazená-los utilizando o formato JSON (*JavaScript Object Notation*). O JSON é um formato que é facilmente legível e compatível com diferentes linguagens de programação, onde as informações são salvas no padrão chave/valor, e é de padrão aberto, contendo um formato compacto que permite troca de dados de forma simples e rápida entre sistemas (JSON, 2023). Ele foi escolhido por permitir de forma compacta armazenar as diferentes informações presentes nos poços, podendo inclusive unir os dados de grandes quantidades de poços em apenas um arquivo com padrão JSON.

3.1.2 Obtenção dos dados do SIAGAS e RIMAS

Na coleta dos dados de poços pertencentes ao SIAGAS e RIMAS, foi empregado um script desenvolvido na linguagem de programação C#. Esse script foi projetado para acessar a página web do poço, conforme ilustrado na Figura 8. A página, escrita em HTML (*HyperText Markup Language*) que pode ser vista Figura 9, tem como objetivo principal apresentar a informação ao usuário, mas não oferece a funcionalidade de salvar essa informação diretamente. Para extração dos dados, o script em C# emprega uma técnica conhecida como *web scraping*, que "raspa" a página e extrai as informações contidas no código HTML. Isso permite a exportação desses dados, facilitando sua manipulação e análise subsequente.

Figura 8 – Exemplo de uma página de um poço do SIAGAS



Fonte: siagasweb.cprm.gov.br (2023).

Figura 9 – Trecho HTML da página do SIAGAS

```

<td width="20%"><font color="#000000" size="-1" face="ARIAL"><b>Poço: 3500026834</b></font></td>
<td width="20%"><font color="#000000" size="-1" face="ARIAL"><b>UF: PR</b></font></td>
<td width="20%"><font color="#000000" size="-1" face="ARIAL"><b>Município: Cianorte</b></font></td>
<td width="70%"><font color="#000000" size="-1" face="ARIAL"><b>Localidade: SECRETARIA MUNICIPAL DE AGRICULTURA</b></font></td>
<td width="30%"><a href="http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/well_show.php?ponto=3500026834">
</tr>
</tbody></table>
<div id="Perfil" style="width:185px;height:98px;float:left;left:0px;position:fixed;">
  <ul class="ui-tabs-nav ui-helper-reset ui-helper-clearfix ui-widget-header ui-corner-all">
    <li class="ui-state-default ui-corner-top ui-tabs-selected ui-state-active"><a href="http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500026834#tabs-2">Con.
    <li class="ui-state-default ui-corner-top"><a href="http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500026834#tabs-3">Geo.
    <li class="ui-state-default ui-corner-top"><a href="http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500026834#tabs-4">Hid.
    <li class="ui-state-default ui-corner-top"><a href="http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500026834#tabs-5">Tes.
    <li class="ui-state-default ui-corner-top"><a href="http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/detalhe.php?ponto=3500026834#tabs-6">Anál.
  </ul>
  <div id="tabs-1" class="ui-tabs-panel ui-widget-content ui-corner-bottom">
<table border="0" cellpadding="1" cellspacing="0" id="newsContent" width="96%" style="BORDER-LEFT: #E00000 2px outset; BORDER-BOTTOM: #E00000 2px outset; BORDER-RIGHT: #E00000 2px outset; BORDER-TOP: #E00000 2px outset">
  <tbody>
    <tr>
      <td width="5%"></td>
      <td width="100%">
        <table border="0" width="100%" cellpadding="0" cellspacing="1">
          <tbody><tr>
            <td width="20%"><font face="arial" size="2"><b>Dados Gerais:</b></font></td>
            <td width="80%"></td>
          </tr>
          <tr>
            <td width="20%" bgcolor="#F9F9F9">&nbsp;<font face="arial" size="2">Nome:</font></td>
            <td width="80%" bgcolor="#F9F9F9">&nbsp;<font face="arial" size="2">&nbsp;&nbsp;&nbsp;&MNT/PR/CN01</font></td>
          </tr>
          <tr>
            <td width="20%" bgcolor="#F9F9F9">&nbsp;<font face="arial" size="2">Data da Instalação:</font></td>
            <td width="80%" bgcolor="#F9F9F9">&nbsp;<font face="arial" size="2">&nbsp;&nbsp;&nbsp;&19/05/2010</font></td>
          </tr>
          <tr>
            <td width="20%" bgcolor="#F9F9F9">&nbsp;<font face="arial" size="2">Proprietário:</font></td>
            <td width="80%" bgcolor="#F9F9F9">&nbsp;<font face="arial" size="2">&nbsp;&nbsp;&nbsp;&CPRM - SUREG/SP</font></td>
          </tr>
        </tbody>
      </td>
    </tr>
  </tbody>
</table>

```

Fonte: O autor (2023).

O script coleta todos os dados presentes na página web do SIAGAS e RIMAS, sendo cada página separada em seis abas (gerais, construtivos, geológicos, hidrogeológicos, teste de bombeamento e análises químicas). Os dados de cada aba são salvos em formato JSON (Figura 10) e os múltiplos poços são salvos em um único arquivo JSON. No caso da coleta dos dados do RIMAS, ocorre o mesmo procedimento do SIAGAS, porém com uma etapa extra contendo um código paralelo para obter as informações do monitoramento químico e de nível d'água, informações exclusivas desse órgão.

Figura 10 – Exemplo das informações convertidas para JSON

```

{
  "Codigo" : 3500026834,
  "Uf" : "PR",
  "Mun" : "Cianorte",
  "Nome" : "MNT/PR/CN01",
  "Latitudedecimal" : -23.693333305720003,
  "Longitudedecimal" : -52.64138886333,
  "Bacia" : "Rio Parana",
  "SubBacia" : "Rios Parana, Paranapanema e outros",
  "Uso_agua" : "Sem uso",

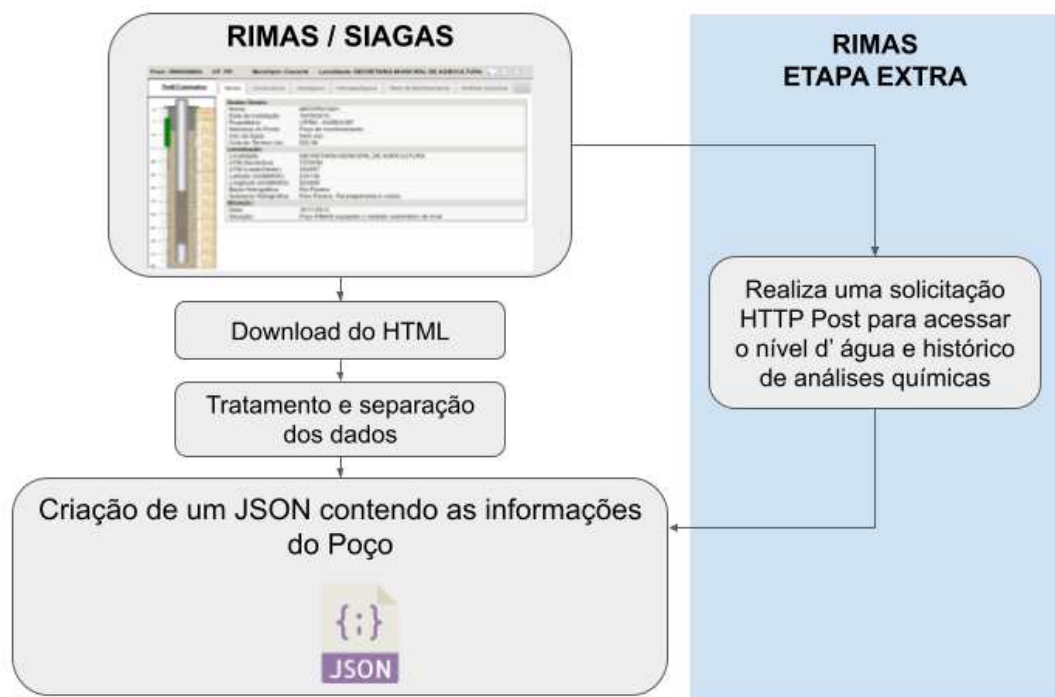
  "Data_IN_Siagas" : "0001-01-01T00:00:00.000+0000",
  "Localidade" : "SECRETARIA MUNICIPAL DE AGRICULTURA",
  "Cota" : "532.56",
  "UTMS" : 7378760,
  "UTMO" : 332657,
  "LAT" : 234136,
  "LONG" : 523829,
  "Data_Insta" : "2010-05-19T03:00:00.000+0000",
  "Dono" : "CPRM - SUREG/SP",
  "Natureza" : "Poço de monitoramento",
  "Situacao" : [
    {
      "Data" : "2014-11-10T02:00:00.000+0000",
      "Situacao" : "Poço RIMAS equipado c medidor automático de nível"
    }
  ]
}

```

Fonte: O autor (2023).

O processo de extração dos dados do SIAGAS e RIMAS por meio do script pode ser visualizado na Figura 11. Esses dados foram extraídos do HTML utilizando a biblioteca *Html Agility Pack*. Essa biblioteca permite a manipulação do HTML, assim pode-se extrair facilmente os dados presentes na página (HTML AGILITY PACK, 2023). Além disso, no RIMAS existe a opção de baixar os dados de nível d'água e histórico de análises químicas. Assim, para automatizar essa coleta é utilizado uma requisição para acessar diretamente essa informação por meio de uma solicitação HTTP Post, que recupera tanto o histórico das análises químicas do poço, quanto o nível de água.

Figura 11 – Processo de extração dos dados do SIAGAS e RIMAS

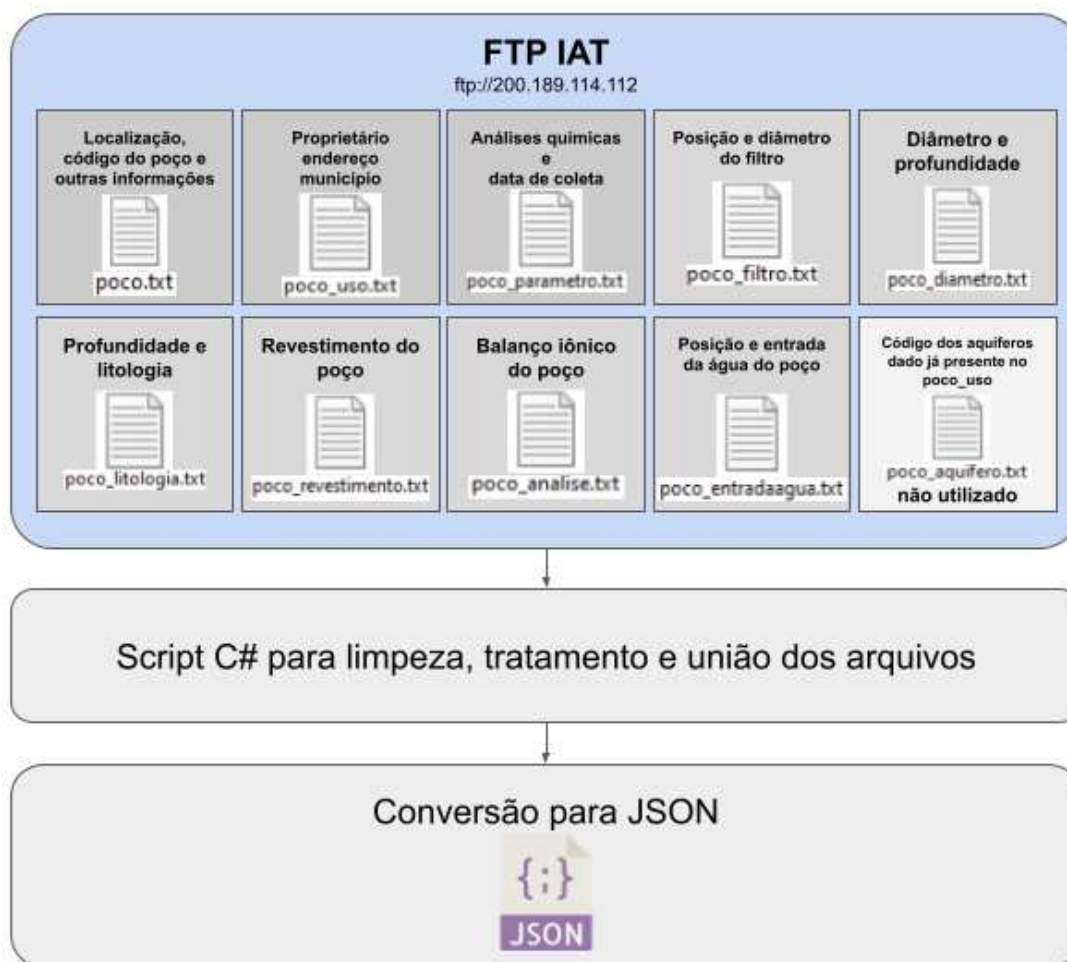


Fonte: O autor (2023).

3.1.3 Obtenção dos dados do IAT

Os poços catalogados pelo IAT são disponibilizados por meio de um FTP e os dados estão organizados em 10 arquivos de texto. Esses arquivos são tratados utilizando um script em C#, com exceção do arquivo `poco_aquifero.txt`, onde suas informações já estão presentes no arquivo `poco.txt`. Esse script faz a limpeza dos dados, retirando informações conflitantes e campos ausentes, como linhas vazias na planilha. Por último, o script unifica os diferentes arquivos em um único JSON, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Tratamento dos dados da base do IAT



Fonte: O autor (2023).

3.2 DESENVOLVIMENTO DO BANCO DE DADOS

Após a coleta e tratamento, os dados são armazenados localmente em arquivos no formato JSON. Assim, para tornar esses dados acessíveis para outros pesquisadores, optou-se por disponibilizá-los em um banco de dados. Um banco de dados é uma coleção de informações como datas, nomes, endereços, entre outros. Essas informações são gerenciadas por um Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD), um software especializado que permite o controle, manipulação e recuperação desses dados, facilitando o acesso e a integração com diversas aplicações. Eles desempenham um papel crucial em várias atividades cotidianas, desde consultas de saldo bancário até o controle de estoques no comércio.

O banco de dados relacional é considerado uma das formas mais importantes de gerenciamento de dados, estabelecendo relações entre os dados, facilitando as interações e consultas. A linguagem padrão para bancos de dados relacionais é a *Structured Query Language* (SQL), que desempenha um papel fundamental em diversos setores da sociedade (ELMASRI; NAVATHE, 2006).

No entanto, a utilização de um banco de dados relacional apresenta algumas limitações, principalmente porque o modelo relacional é mais rígido e fica preso a um esquema de tabelas para todos os dados dentro do banco. Assim, como os dados coletados neste trabalho são de instituições distintas, é preferível um banco de dados com maior flexibilidade e, nesse sentido, foi escolhido um modelo de banco de dados NoSQL (*No Structured Query Language*). Esse modelo foi desenvolvido para tratar as grandes quantidades de dados provenientes de *bigdata* e sistemas online (VERA-OLIVERA et al., 2021).

Os bancos de dados NoSQL, como o *MongoDB*, oferecem vantagens em relação aos modelos relacionais, como maior flexibilidade e facilidade de uso. Isso se deve ao fato de que os modelos relacionais armazenam informações em tabelas, enquanto o *MongoDB* utiliza o formato de documento JSON para armazenamento, eliminando a necessidade de divisão em planilhas ou de uma estrutura fixa como ocorre no modelo relacional. Essa abordagem permite uma maior adaptabilidade aos diferentes formatos de dados, uma vez que cada documento pode ter uma estrutura diferente, possibilitando a adição ou remoção de campos sem alterar a estrutura geral do banco de dados (BRADSHAW; BRAZIL; CHODOROW, 2019).

3.2.1 MongoDB

O Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) escolhido foi *MongoDB*. Esse é um banco de dados não relacional que armazena as informações em formato JSON facilitando o armazenamento, busca de dados e integração com outros sistemas.

Dessa forma, para a inserção dos dados no banco de dados foi desenvolvido um software em C#, no qual cada poço é inserido como um documento JSON no banco de dados do *MongoDB* (ECMA INTERNATIONAL, 2017). Um exemplo de um JSON representando um poço pode ser observado na Figura 13. Independentemente

da fonte dos dados (RIMAS, SIAGAS ou IAT), os documentos foram escritos de forma padronizada, o que facilita as análises desses dados.

Figura 13 – Exemplo dos dados de um poço em JSON

```

1 {
2   "_id" : ObjectId("61fd2f1cd54356158f1860e1"),
3   "Codigo" : "3500027888",
4   "Uf" : "SP",
5   "Mun" : "Boa esperanca do sul",
6   "Nome" : "MNT/SP/BE01",
7   "Localidade" : "SITIO SOBRADINHO",
8   "Analises" : [
9     {
10      "Nome_Ana" : "Condutividade Elétrica (µS/cm):",
11      "Lab_Ana" : "0519/SP/BE01",
12      "Data_Ana" : ISODate("2019-05-07T03:00:00.000Z"),
13      "Valor_Ana" : 14.4,
14      "Uni_Ana" : null
15    },
16    {
17      "Nome_Ana" : "Turbides (NTU):",
18      "Lab_Ana" : "0519/SP/BE01",
19      "Data_Ana" : ISODate("2019-05-07T03:00:00.000Z"),
20      "Valor_Ana" : 9.0,
21      "Uni_Ana" : null
22    }
23  ],
24   "Cota" : "471.01",
25   "Natureza" : "Poço de monitoramento",
26   "Uso_agua" : "Sem uso",
27   "Situacao" : [
28     {
29      "Data" : ISODate("2014-10-27T02:00:00.000Z"),
30      "Situacao" : "Poço RIMAS equipado c medidor automático de nível"
31    }
32  ]
33 }
34

```

Fonte: O autor (2023).

3.2.2 Modelagem dos dados

Os dados foram armazenados de forma a facilitar o seu tratamento, mesmo sendo de fontes diferentes, por meio de uma estrutura unificada para análises químicas, dados construtivos, geológicos e hidrogeológicos. Assim, essas informações são estruturadas de forma idêntica em todos os poços do Banco de Dados.

Os dados de análises químicas foram agrupados dentro de um conjunto de dados, o qual consiste em uma lista contendo todas as análises. Cada análise contém

os dados sobre o laboratório, a data da coleta, o nome, unidade e valor da amostra, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Forma de organização das análises químicas

Análises Químicas

Nome análise ex: "Cálcio"	Valor análise ex: "17,21"	Unidade ex: "mg/L (ppm)"	Laboratório ex: "LabAguas"	Data análise ex: "12/02/2017"
Nome análise ex: "Bromo"	Valor análise ex: "0,21"	Unidade ex: "mg/L (ppm)"	Laboratório ex: "LabAguas"	Data análise ex: "12/02/2017"

...

Exemplo

```
"Analises" : [
  {
    "Nome_Ana" : "Calcio (Ca)",
    "Lab_Ana" : "0519/SP/BS01",
    "Data_Ana" : ISODate("2019-05-14T03:00:00.000Z"),
    "Valor_Ana" : 7.18,
    "Uni_Ana" : "mg/L (ppm)"
  },
  {
    "Nome_Ana" : "Cloro (Cl)",
    "Lab_Ana" : "0519/SP/BS01",
    "Data_Ana" : ISODate("2019-05-14T03:00:00.000Z"),
    "Valor_Ana" : 5.507,
    "Uni_Ana" : "mg/L (ppm)"
  }
]
```

Fonte: O autor (2023).

Os dados construtivos foram armazenados em um conjunto de dados contendo as informações de profundidade, data e método de perfuração, assim como o executor da obra. O perfil construtivo é articulado em um grupo de listas, que inclui informações sobre o diâmetro, o revestimento e outras características pertinentes à construção. Essas informações podem ser visualizadas na Figura 15.

Figura 15 – Forma de organização dos dados construtivos

Dados Construtivos

Profundidade inicial ex: "0"	Profundidade final ex: "150"	Profundidade util ex: "150"
Data Inicial Perfuração ex: "01/02/2002"	Data Final Perfuração ex: "02/02/2002"	Executor ex: "Sanepar"
Método ex: "Sanepar"		

Perfil Construtivo

Diâmetro	Entrada d'água	Boca do Tubo
Filtro	Revestimento	Espaço Anular

Exemplo

```

"Construtivo" : {
  "ProfundidadeI" : "0.00",
  "ProfundidadeF" : "52.70",
  "ProfundidadeUtil" : "52.70",
  "Executor" : "A.F. BORSATO E CIA LTDA",
  "Data_inicial_Perfuracao" : ISODate("2011-03-19T03:00:00.000Z"),
  "Data_final_Perfuracao" : ISODate("2011-03-19T03:00:00.000Z"),
  "Metodo" : "Rotativo",
  "Diametro" : {
    {
      "Data" : Date(-621355968000000),
      "De" : "0.00",
      "Ate" : "52.70",
      "Diametro_Pol" : "8 1/2",
      "Diametro_IPM" : "215.9000"
    }
  },
  "Revestimento" : {
    {
      "Data" : Date(-621355968000000),
      "De" : "0.00",
      "Ate" : "32.00",
      "Material" : "Plastico p.v.c.",
      "Diametro_Pol" : "4",
      "Diametro_IPM" : "101.6000"
    }
  }
}

```

Fonte: O autor (2023).

Para os dados geológicos, duas listas foram utilizadas: uma contendo a formação geológica do poço e o outra a formação litológica, com mais detalhes sobre o solo nas diferentes profundidades. Um exemplo pode ser observado na Figura 16. Além disso, os dados hidrogeológicos, visíveis na Figura 17, são compostos por informações sobre o aquífero e uma lista contendo as medições de nível d'água.

Figura 16 – Forma de organização dos dados geológicos

Dados Geológicos

Formação Geológica

de ex: 0m	até ex: 145m	formação ex: Serra Geral
--------------	-----------------	-----------------------------

Formação Litológica

de ex: 0m	até ex: 15m	litologia ex: Solo argiloso	descrição ex: Solo argiloso, argila arenosa fina a média
--------------	----------------	--------------------------------	---

Exemplo

```

"Geologia" : {
  "Feicao_Geomorfica" : "Planalto",
  "Formacoes_Geologicas" : [{
    {
      "De" : "0.00",
      "Ate" : "52.70",
      "Formacao" : "Grupo Bauru"}},
  "Litologia" : [ {
    {
      "De" : "0",
      "Ate" : "12",
      "Litologia" : "Areia fina",
      "Descricao_Lit" : "Areia fina, castanha avermelhada"},
    {
      "De" : "12",
      "Ate" : "52.7",
      "Litologia" : "Argila arenosa",
      "Descricao_Lit" : "Argila arenosa marrom"}]}]
}

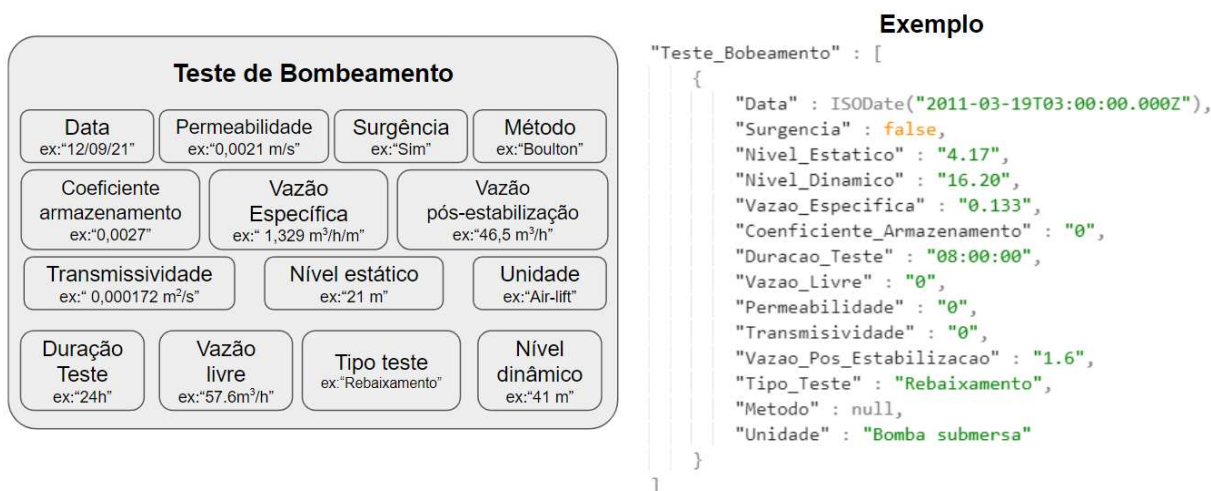
```

Fonte: O autor (2023).

Figura 17 – Forma de organização dos dados hidrogeológicos

Fonte: O autor (2023).

Outro tipo de informação que é padronizada são os testes de bombeamento, que são armazenados em um conjunto de dados contendo: data, duração, método, coeficiente e outras informações, como pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18 – Forma de organização dos Testes de Bombeamento

Fonte: O autor (2023).

3.3 DISPONIBILIZAÇÃO

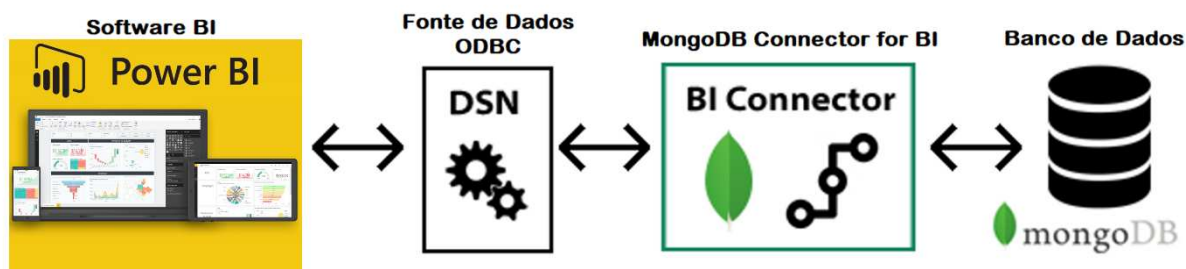
A disponibilização dessas informações foi planejada de forma que futuros usuários do sistema consigam obter e processar esses dados com facilidade. Nesse sentido, os próximos tópicos abordam algumas formas de acesso ao Banco de Dados.

3.3.1 Compatibilidade e utilização dos dados em plataformas BI

O termo BI se refere a tecnologias, softwares e aplicações que atuam na coleta, tratamento e análise de informações, normalmente para o mundo corporativo, mas que podem também ser aplicadas na área ambiental (GARTNER, 2022). Dentre as ferramentas de BI, uma das principais é o Power BI (2022) da Microsoft, o qual permite conectar diversos serviços e analisar informações para criar e compartilhar relatórios dinâmicos (MICROSOFT, 2022). Nesse sentido, esse software foi escolhido para a realização das análises.

Os softwares de BI operam com uma estrutura de tabelas, organizando os dados em colunas e linhas, e podem utilizar relacionamentos para vincular informações em diferentes tabelas. Quando os dados são armazenados em um formato não relacional, como em alguns bancos de dados NoSQL, é preciso convertê-los para um modelo relacional compatível com as ferramentas de BI, a fim de permitir o acesso e a manipulação das informações (MONGODB, 2021). Para a compatibilização, foi utilizada a metodologia descrita por (Ashraf, 2019), a qual pode ser visualizada na Figura 19. Esse método conecta uma fonte de dados *Open Database Connectivity* (ODBC) (2021), que está presente nos computadores com o sistema operacional Windows, ao *MongoDB Connector for BI* (2021), o qual converte as informações presentes no Banco de Dados para um modelo relacional de forma que os softwares de BI consigam acessar esses dados. Assim, o software de BI pode acessar essas informações pelo ODBC e essas são importadas em tabelas no estilo do banco de dados *MySQL*.

Figura 19 – Acesso de softwares de BI ao Banco de Dados



Fonte: adaptado de Ashraf (2019).

3.3.2 Acesso aos dados via *webservice RESTful*

Webservice é uma solução para integração de sistemas independentemente da plataforma ou linguagem de programação utilizada, para isto utiliza-se uma arquitetura para unificação desses sistemas. O webservice RESTful é um webservice que utiliza padrões HTTP simples para permitir a integração e troca de informação, esses padrões são utilizados por APIs (Interfaces de Programação de Aplicativos), realizando a comunicação entre sistemas distintos (Microsoft, 2023).

As APIs, as quais são amplamente utilizadas por aplicativos web modernos. Entre os benefícios das APIs, destaca-se a capacidade do cliente de fazer chamadas à API usando protocolos HTTP, independentemente da linguagem de programação em que a API foi desenvolvida. Por exemplo, uma API desenvolvida em *C#* pode se comunicar com um script desenvolvido em *Python*. Isso permite uma integração entre diferentes tecnologias e linguagens de programação.

Além disso, a API permite que o usuário não tenha contato direto com o banco de dados. Assim os usuários enviam comandos para a API que interage com o banco de dados analisando as ações e devolvendo o que foi requerido (MDN, 2021). A REST APIs utiliza métodos HTTP para realizar operações e, conforme Fielding e Reschke (2014), alguns dos métodos são:

- GET: retorna dados ao cliente, por exemplo o cliente pode utilizar o método GET para obter uma lista de poços;
- POST: utilizado para enviar uma informação ao servidor, como formulários por exemplo, realizando alterações no servidor;
- PUT: utilizado para substituir uma informação pela que está sendo enviada, pode ser uma alteração em um cadastro por exemplo;
- DELETE: serve para requerer a remoção de um recurso, como por exemplo a remoção de um cadastro.

A REST API facilita o acesso ao Banco de Dados e pode ser desenvolvida utilizando diversas linguagens e plataformas, para elaboração da API deste trabalho foi utilizada a linguagem *Python* e o framework FastAPI (RAMÍREZ, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROGRAMA PARA OBTENÇÃO DOS DADOS

O software desenvolvido permite a coleta e unificação da exportação dos dados do SIAGAS, RIMAS e IAT. A obtenção dos dados dessas instituições foi organizada em seções separadas, considerando as características específicas e os métodos de disponibilização adotados por cada uma. Posteriormente à coleta, os resultados podem ser armazenados em um arquivo no formato JSON, com uma extensão distinta designada para cada sistema. Além disso, o software oferece a funcionalidade de carregar informações previamente armazenadas no dispositivo e transferi-las diretamente para o banco de dados *MongoDB*.

4.1.1 Coleta de Dados do SIAGAS

A Figura 20 exemplifica a aba de coleta de dados do SIAGAS em que os poços são identificados por um código de 10 dígitos, cujos dois primeiros representam um conjunto de estados. Nesse sentido, o software foi desenvolvido para separar a coleta de dados por regiões, sendo as regiões pré-estabelecidas determinadas pelo primeiro e último código dos poços correspondentes a cada grupo de estados.

Além disso, a ferramenta possibilita a definição de um intervalo personalizado para a aquisição de dados. Dessa forma, o usuário pode escolher o intervalo desejado, e a coleta é executada de forma automatizada. Posteriormente, o usuário pode optar por armazenar os dados coletados localmente ou transferi-los diretamente para o banco de dados *MongoDB*.

Figura 20 – Aba para coleta de poços do SIAGAS

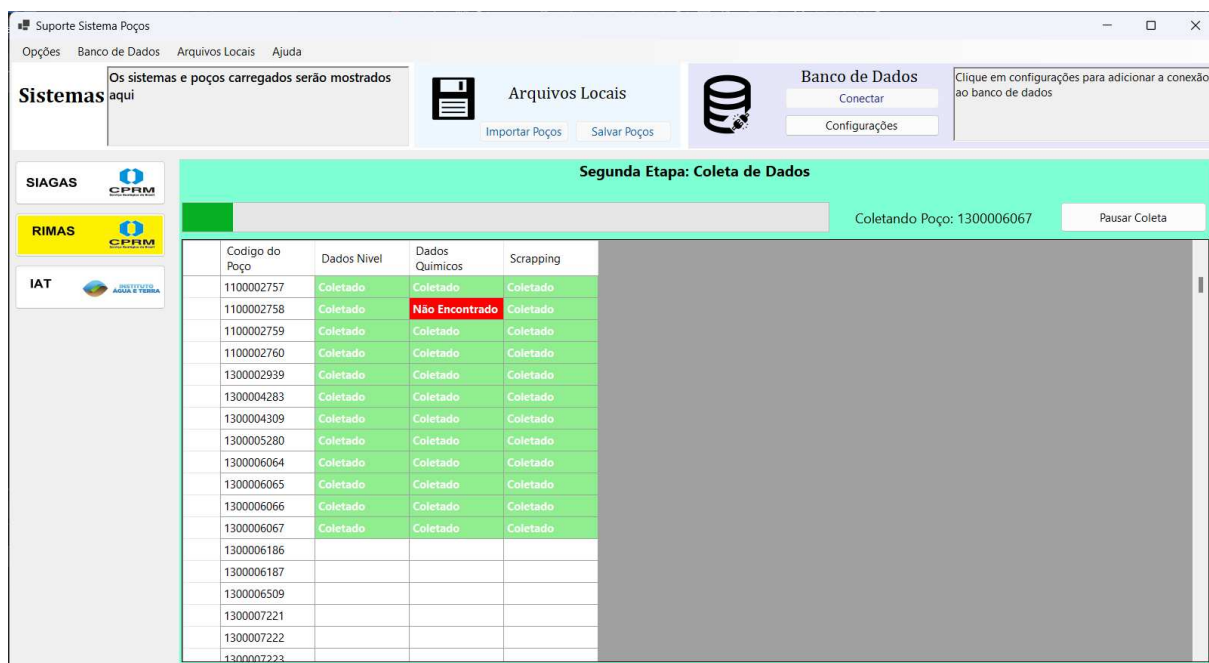
Codigo	Estado	Município	Localidade
3500000003	SP	Echapora	AMADEO AMARAL
3500000008	PR	Altamira do parana	ALTAMIRA/RIO PIQUIRI
3500000009	PR	Santa maria do oeste	CHAPÉU DO SOL
3500000010	SP	Rinopolis	LAGOA AZUL
3500000011	PR	Roncador	RONCADOR
3500000012	PR	Sao carlos do ivai	SAO CARLOS DO IVAI
3500000013	SP	Taciba	
3500000014	SP	Tarabai	
3500000015	SP	Presidente epitacio	
3500000017	PR	Pinhao	
3500000018	SP	Olimpia	
3500000019	SP	Paraguacu paulista	PARAGUACU PAULISTA
3500000020	SP	Lins	
3500000021	PR	Campo mourao	CAMPO MOURAO

Fonte: O autor (2023).

4.1.2 Coleta de Dados do RIMAS

A coleta de dados do RIMAS é conduzida de maneira similar à do SIAGAS. Contudo, devido à quantidade de poços do RIMAS ser inferior a 500, em contraste com mais de 300 mil poços pertencentes ao SIAGAS, a coleta é efetuada de uma só vez por meio da lista de poços do RIMAS. Na primeira etapa, conforme ilustrado na Figura 21, é possível coletar automaticamente a lista de poços, utilizando a biblioteca *Selenium*, ou o usuário pode optar por baixar manualmente o arquivo do site do RIMAS e inseri-lo no programa.

Figura 21 – Aba para coleta de poços do RIMAS

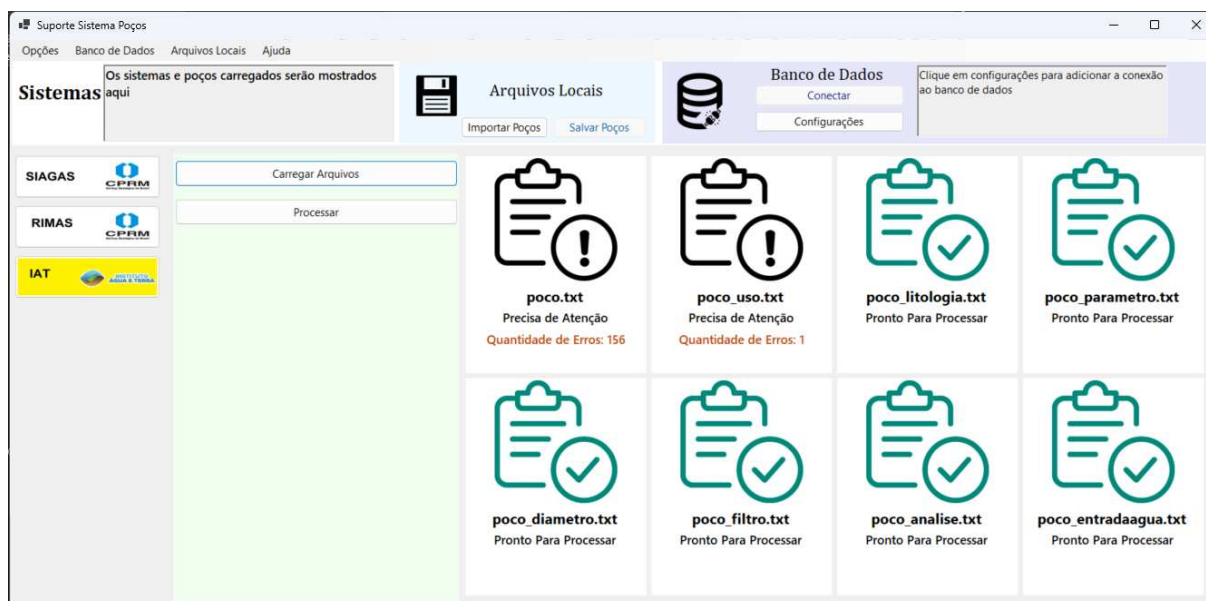


Fonte: O autor (2023).

4.1.3 Coleta de Dados do IAT

O tratamento de dados dos poços pertencentes ao IAT é realizado utilizando o mesmo software, embora a coleta de dados seja feita manualmente por meio do FTP do IAT (2023). No FTP, devem ser localizados os arquivos que contêm as informações relativas às águas subterrâneas, conforme elucidado previamente na Figura 12. Esses arquivos podem ser importados para o software por meio da opção "carregar arquivos". Posteriormente, os arquivos são convertidos em tabelas para análise e identificação de possíveis inconsistências. Essa verificação envolve assegurar que os dados em cada coluna estejam em conformidade com o tipo esperado para aquela específica coluna. Por exemplo, a coluna denominada "profundidade" deve conter apenas valores numéricos, a coluna de análise química deve conter decimais, e a coluna de coordenadas geográficas deve apresentar coordenadas apropriadas. Caso erros sejam identificados durante a análise, o software destacará o campo e a tabela em questão, permitindo que o usuário faça as correções necessárias. A Figura 22 demonstra a maneira como os arquivos são exibidos no software. Nesse exemplo, dois arquivos contêm erros, os quais podem ser facilmente corrigidos pelo usuário.

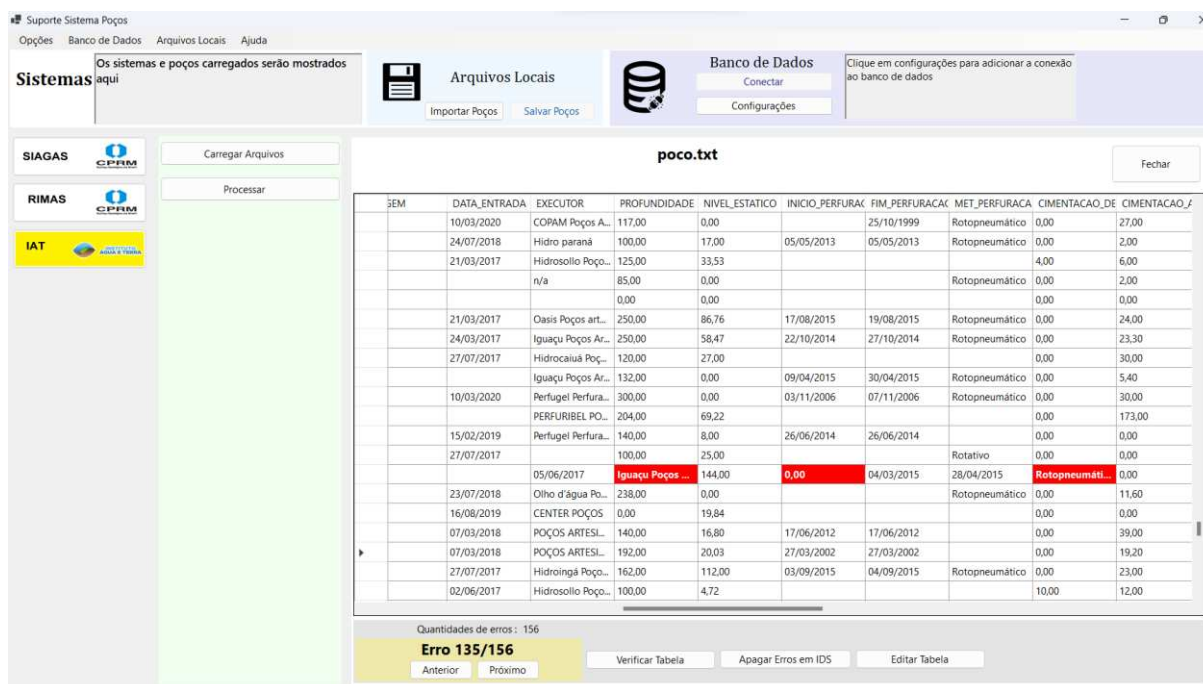
Figura 22 – Aba para coleta de poços do IAT



Fonte: O autor (2023).

Ao optar por visualizar os erros, o usuário será apresentado à tabela do arquivo correspondente, conforme ilustrado na Figura 23. Os erros são destacados na cor vermelha, e a quantidade de erros é igualmente indicada. O software oferece a possibilidade de remover todos os erros de forma automática, mediante a exclusão dos campos em questão. Alternativamente, o usuário pode editar os campos, ajustando e corrigindo as informações conforme necessário.

Figura 23 – Edição de tabelas do IAT



Fonte: O autor (2023).

Após verificar e corrigir os erros, o usuário possui a opção de clicar em “Processar”. Isso leva à conversão dos dados dos poços para o formato JSON, que são subsequentemente exibidos na parte superior do programa. Após o processamento, os poços são listados na seção “Sistemas”, como ilustrado na Figura 24.

Figura 24 – Parte do menu superior para visualização dos dados coletados



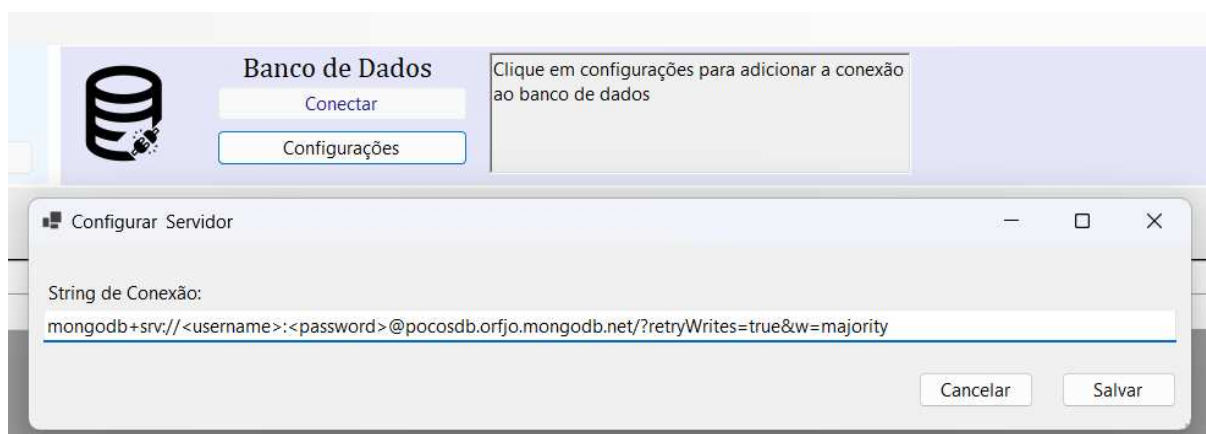
Fonte: O autor (2023).

4.2 ENVIO PARA O BANCO DE DADOS

O envio das informações dos poços para o banco de dados é realizado no mesmo software empregado para a coleta. Na fase inicial, os poços são carregados, e caso existam coletas provenientes de diferentes instituições, essas serão

subsequentemente categorizadas e divididas de acordo com o sistema específico ao qual pertencem. Após os poços serem carregados, é necessário inserir a *string* de conexão do *MongoDB*. Essa conexão pode ser estabelecida com um banco de dados criado localmente ou na nuvem, utilizando serviços como o *MongoDB Atlas*, que permite a criação do banco de dados na nuvem. Com a inserção da *string* de conexão, o programa é habilitado a se conectar ao banco de dados para enviar e atualizar as informações. Esse processo é realizado por meio da janela do banco de dados, visível na Figura 25. Após estabelecer a conexão, uma tela é aberta para visualizar os dados do sistema que serão inseridos e atualizados, bem como informações referentes à quantidade de poços presentes no sistema.

Figura 25 – Parte do menu superior para exportação dos dados e janela de configuração



Fonte: O autor (2023).

A seção de exportação, ilustrada na Figura 26, possibilita a visualização da quantidade total de poços cadastrados, bem como a quantidade que será inserida e atualizada. Nesta aba, após selecionar o botão "Exportar", os dados são enviados para o *MongoDB*. Dentro desse banco de dados, cada sistema é armazenado em uma coleção específica, que atua como um repositório para os poços correspondentes.

Figura 26 – Aba de exportação dos poços

Fonte: O autor (2023).

4.3 ANÁLISE DOS POÇOS EXPORTADOS PARA O BANCO DE DADOS

O total de poços coletados utilizando o software está descrito na Tabela 1. Entre os três sistemas coletados, somente o SIAGAS apresenta uma quantidade de dados inferior à cadastrada no sistema. Tal discrepância pode ser atribuída à vasta quantidade de poços, onde alguns podem não ter sido coletados devido a problemas de conexão, ou foram cadastrados subsequentemente à coleta de dados. É importante ressaltar que com a realização de novas coletas de dados, a tendência é que essa diferença diminua progressivamente.

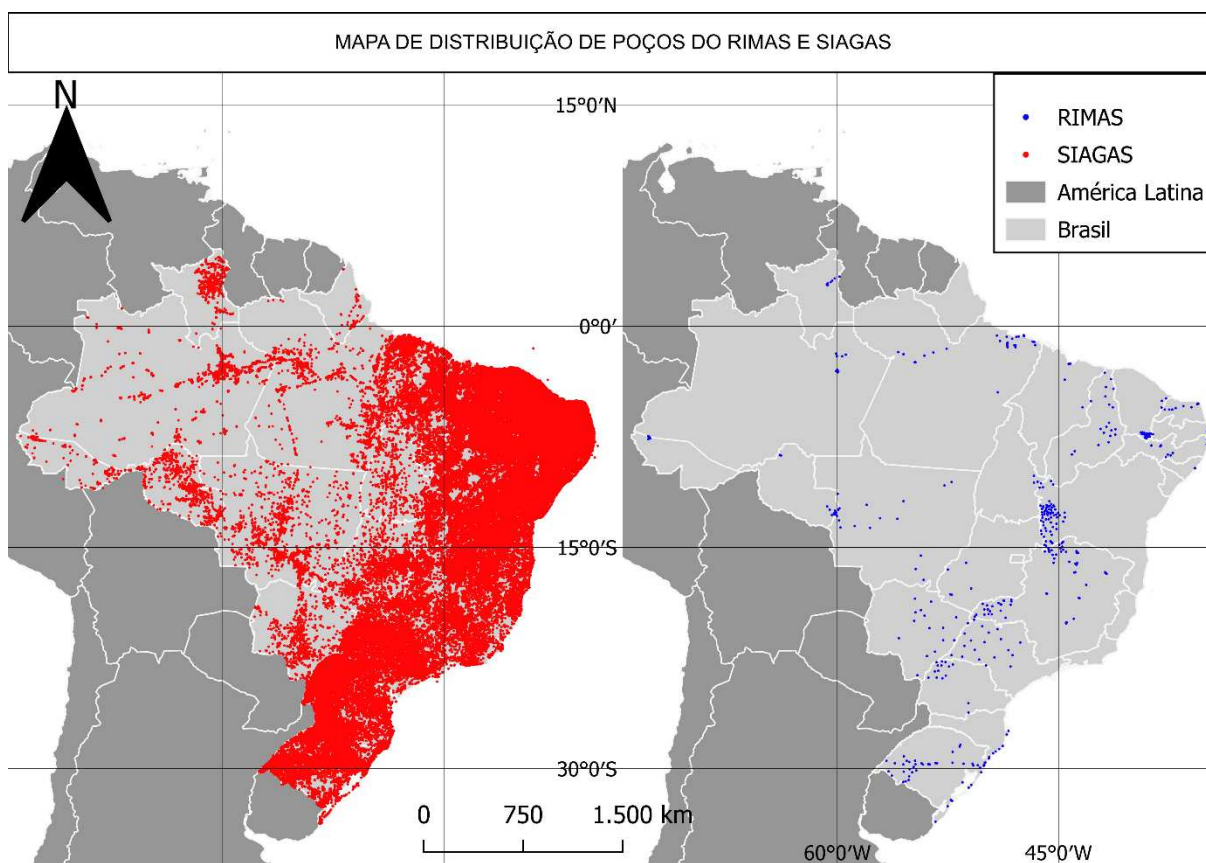
Tabela 1 - Quantidade de poços coletadas por sistema

Sistema	Quantidade de Poços Cadastrados	Quantidade de Poços Coletados
SIAGAS	365310	364076
RIMAS	448	448
IAT	20008	20008

Fonte: O autor (2023).

O mapa representando os poços coletados dos sistemas RIMAS e SIAGAS é apresentado na Figura 27. Nele, é possível observar a distribuição dos poços em todo o território nacional. Embora o RIMAS contenha apenas 448 poços, esses são estrategicamente posicionados em aquíferos específicos e contêm informações vitais para o seu monitoramento. No mapa correspondente ao SIAGAS, é possível discernir a urbanização e exploração agrícola do território nacional, com uma densidade de poços mais acentuada nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, e uma presença menos expressiva nas regiões Norte e Centro-Oeste.

Figura 27 – Mapa de distribuição de poços coletados do SIAGAS E RIMAS

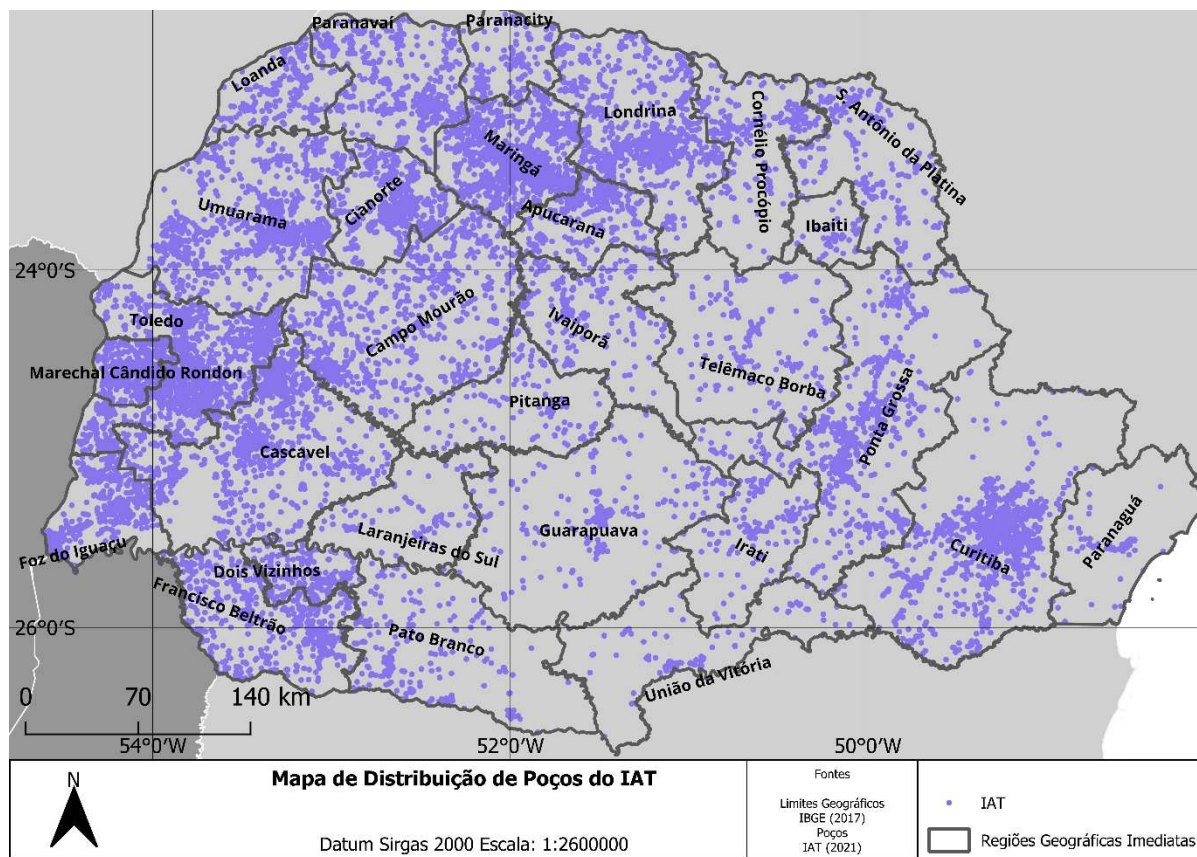


Fonte: O autor (2023).

O mapa de distribuição de poços coletados do IAT, ilustrado na Figura 28, evidencia a disposição desses poços pelo estado do Paraná, fornecendo uma representação visual da distribuição desses recursos hídricos subterrâneos na região. A análise desse mapa permite verificar a distribuição dos poços pelas regiões

geográficas do estado, evidenciando a extensa utilização de recursos hídricos subterrâneos no território estadual.

Figura 28 – Mapa de distribuição de poços coletados do IAT



Fonte: O autor (2023).

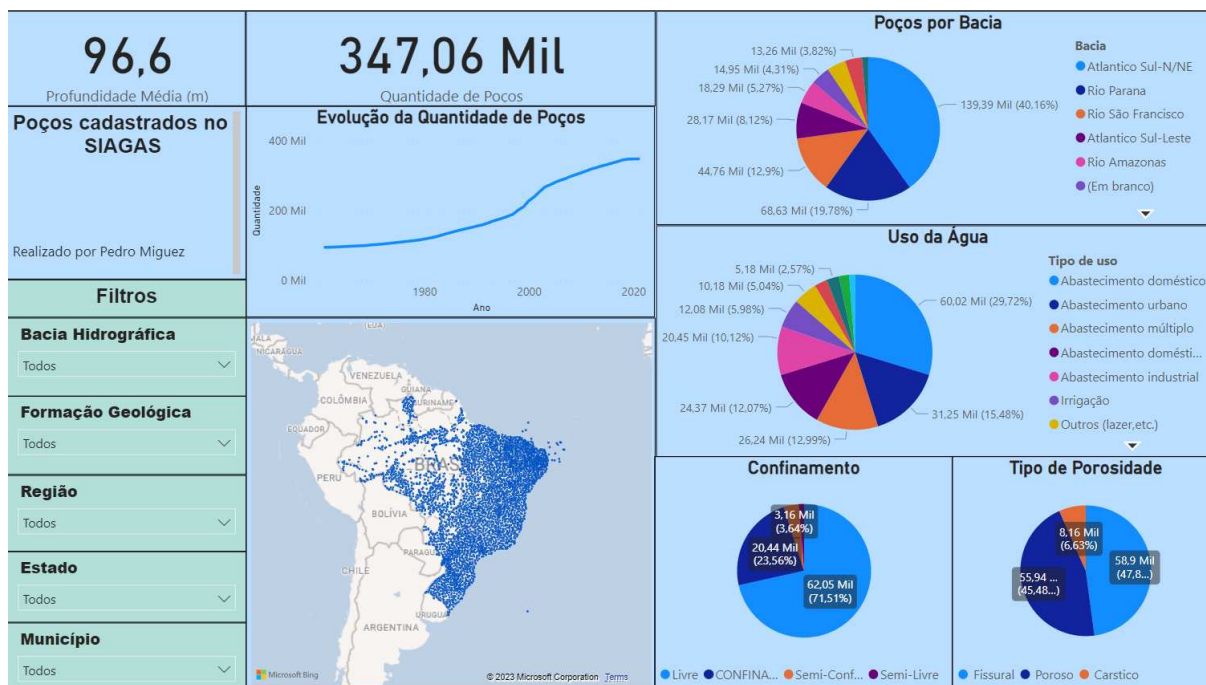
4.4 CONEXÃO DO BANCO DE DADOS COM O POWER BI

Utilizou-se o *MongoDB Connector for BI* para criar um *dashboard* dos poços pertencentes ao SIAGAS no Power BI. O *dashboard* permite a filtragem dos poços por critérios como bacia hidrográfica, formação geológica e região. Tal metodologia oferece uma forma dinâmica e interativa de explorar e visualizar as características distintas dos poços, enriquecendo a análise e compreensão desses recursos.

O SIAGAS foi escolhido devido à maior quantidade de poços disponíveis visando demonstrar o potencial dessa integração entre banco de dados e Power BI, como pode ser visto na Figura 29. Porém, podem ser criados *dashboards* dos outros sistemas, havendo a possibilidade de, no futuro, elaborar um *dashboard* específico para o RIMAS, dado que esse sistema contém informações importantes acerca do

nível estático de aquíferos, o que pode ser de significativo valor para análises e monitoramentos subsequentes.

Figura 29 – Power BI dos poços cadastrados no SIAGAS



Fonte: O autor (2023).

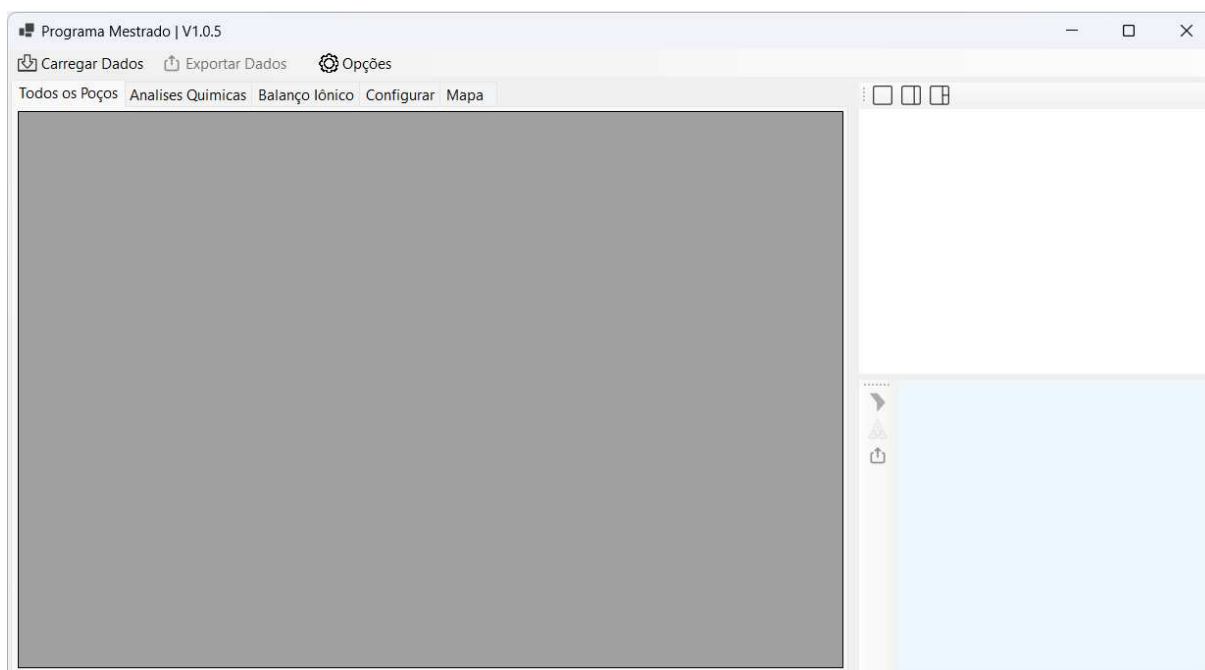
4.5 PROGRAMA PARA ANÁLISE DOS DADOS

Com o objetivo de realizar as análises hidroquímicas das águas subterrâneas, o software GDA (2020) foi desenvolvido como uma solução alternativa às ferramentas preexistentes. Uma das principais limitações dessas ferramentas é a manipulação de dados em grande escala e a personalização dos gráficos de *Piper* e *Stiff*.

Contudo, durante o desenvolvimento deste estudo, foi evidenciado uma dificuldade associada à obtenção de dados das fontes utilizadas, representando um desafio no processo de análise. Para superar essa barreira e facilitar a análise de dados de águas subterrâneas, um novo software foi desenvolvido, incorporando a funcionalidade de plotagem dos diagramas do GDA e alguns recursos adicionais. Essas melhorias foram realizadas para atender às necessidades dos pesquisadores que se dedicam às análises de águas subterrâneas, oferecendo uma plataforma mais acessível e eficiente. A tela inicial do software pode ser visualizada na Figura 30, e o

primeiro passo ao iniciar o programa consiste em carregar os poços, por meio do botão "Carregar Dados".

Figura 30 – Menu principal do software

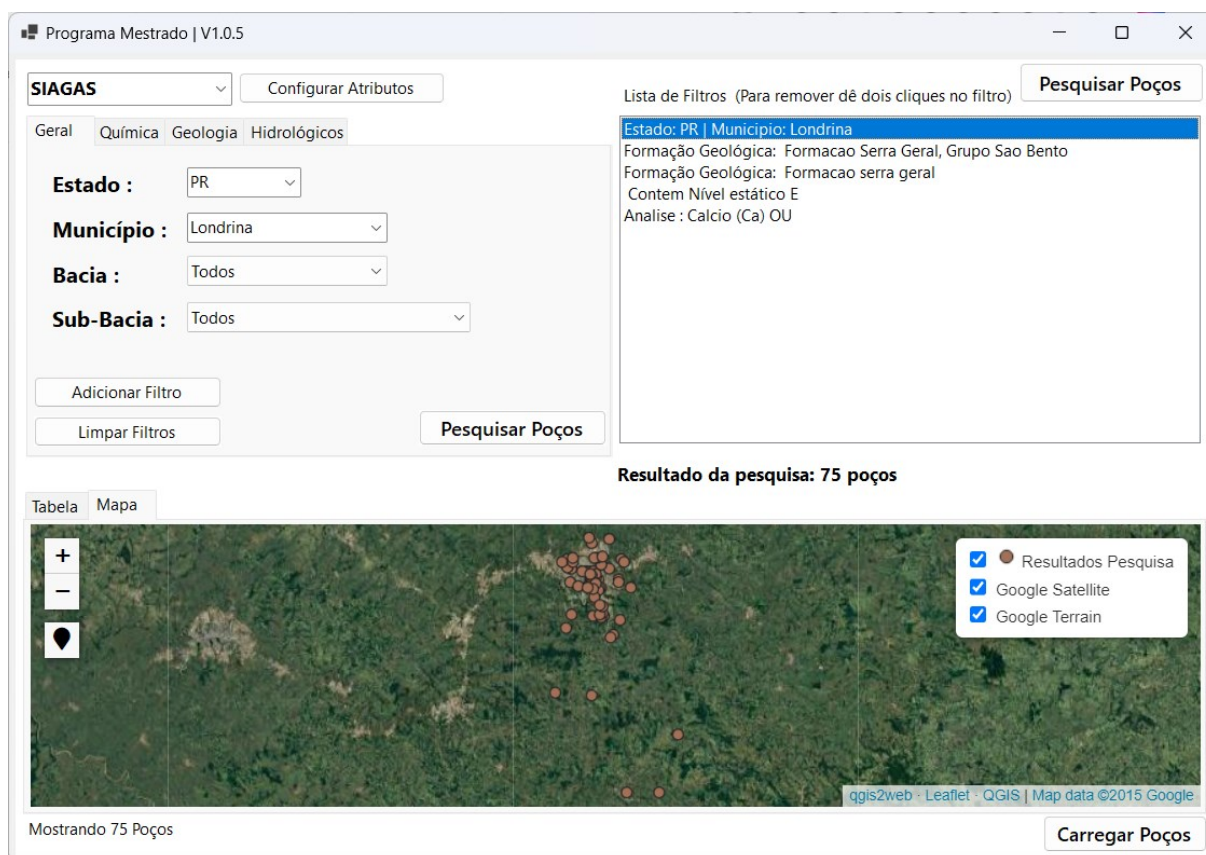


Fonte: O autor (2023).

4.5.1 Acesso da ferramenta ao Banco de Dados

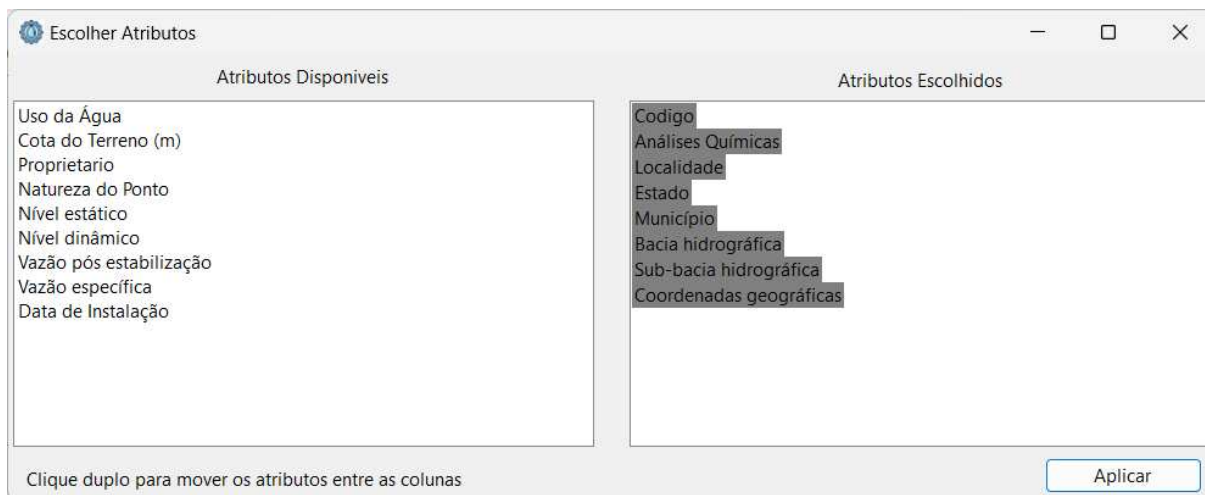
O botão de “Carregar Dados” abre uma janela para pesquisar e enviar as informações dos poços ao programa. Utilizando a *string* de conexão, o software acessa diretamente o banco de dados e consulta os sistemas cadastrados, bem como informações pertinentes, como municípios e estados de cada sistema, análises químicas, entre outras. Esses dados servem para alimentar o filtro que será posteriormente definido pelo usuário, conforme ilustrado na Figura 31. O usuário seleciona o sistema do qual deseja extrair dados e tem a possibilidade de filtrar os resultados por critérios como localização geográfica e bacia hidrográfica.

Figura 31 – Janela de pesquisa de poços do software.



Fonte: O autor (2023).

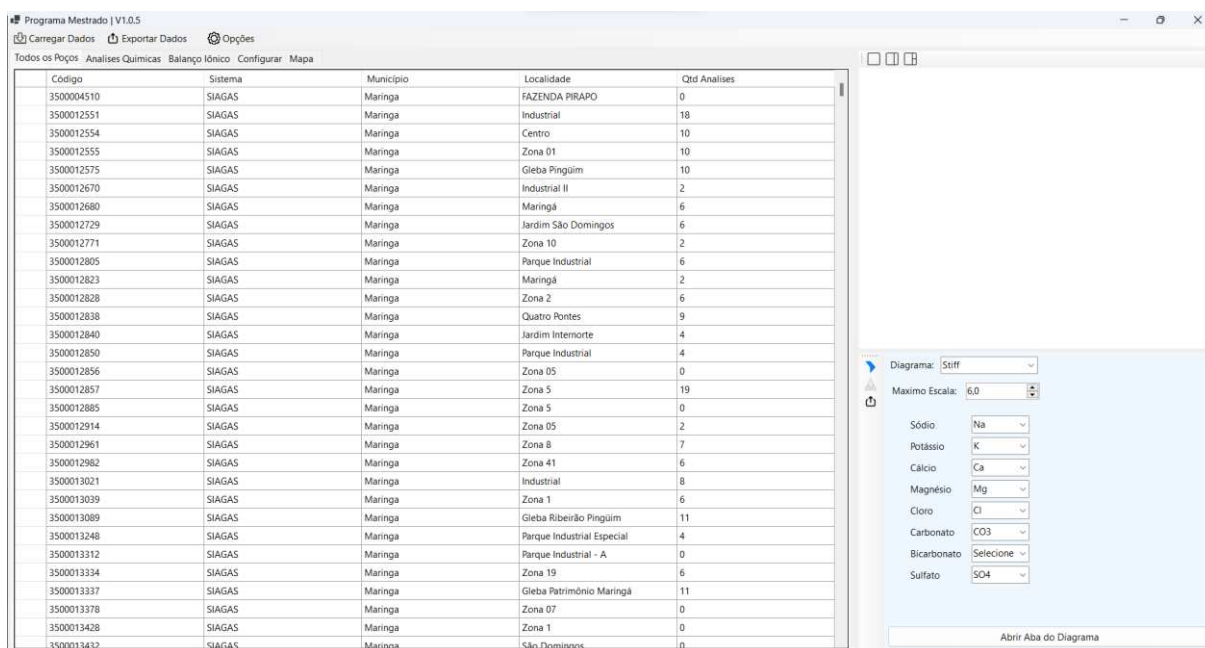
Após a seleção do sistema pelo usuário e a definição dos filtros desejados, o resultado da pesquisa pode ser visualizado tanto em formato de mapa quanto em tabela. Essa funcionalidade auxilia o pesquisador na visualização espacial das informações pesquisadas, proporcionando uma compreensão mais clara dos poços em análise. A janela de pesquisa oferece ainda a possibilidade de selecionar quais parâmetros serão importados, facilitando ao pesquisador o acesso às informações de seu interesse sobre águas subterrâneas. Esse processo é conduzido por meio do botão "Configurar Atributos", o qual aciona a abertura da janela ilustrada na Figura 32. Tal funcionalidade contribui para uma análise mais focada e eficiente, permitindo a personalização da extração de dados conforme as necessidades específicas do estudo.

Figura 32 – Janela para seleção de atributos a importar

Fonte: O autor (2023).

4.5.2 Visualização e tratamento dos dados

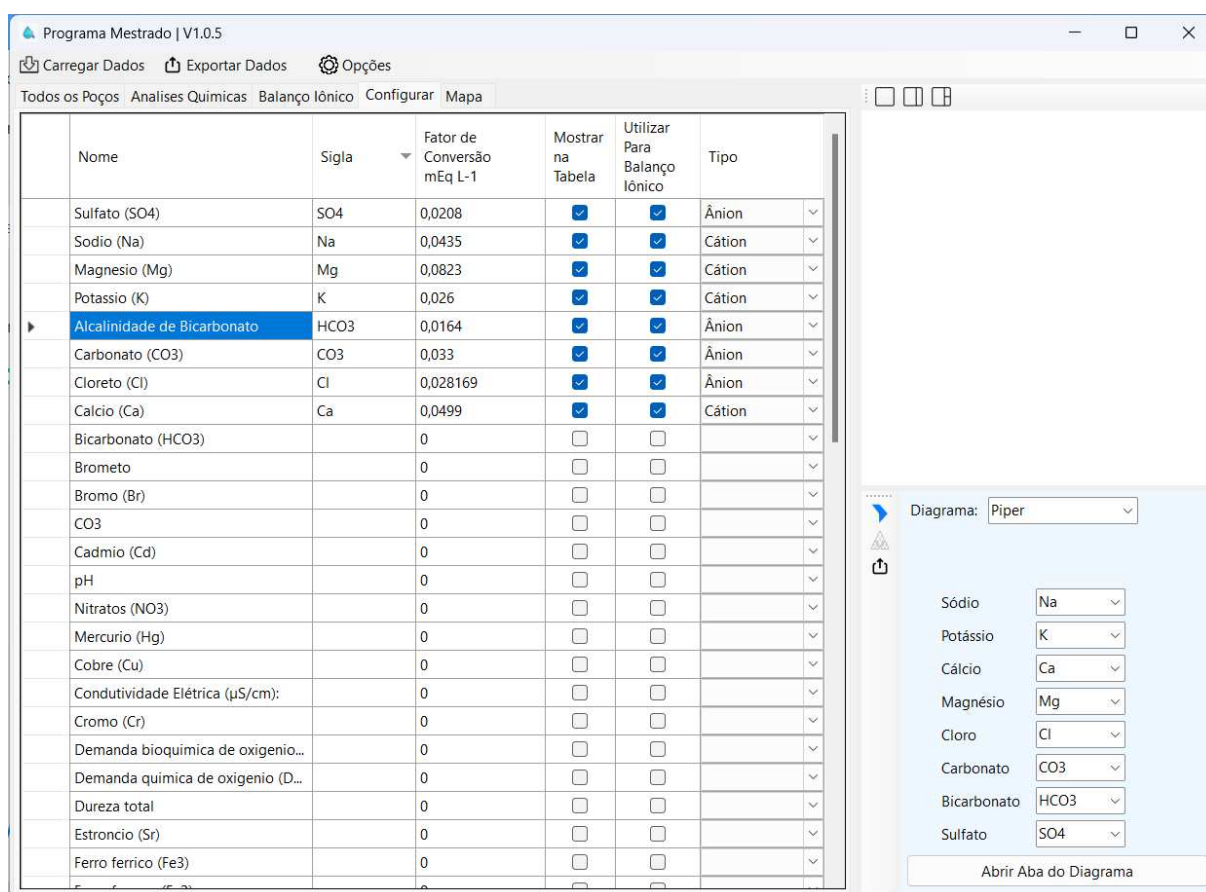
Após a importação dos poços, os dados são carregados na tela inicial do programa, onde é possível visualizar as tabelas, selecionar o mapa e visualizar os diagramas dos poços, como pode ser visto na Figura 33. Além disso, é possível exportar esses dados para serem utilizados em outros programas por meio da aba de exportação.

Figura 33 – Tela Inicial após carregamento dos dados

Fonte: O autor (2023).

Para visualizar e elaborar os diagramas de *Piper* e *Stiff*, a lista de análises químicas dos poços é carregada. Com essa lista, torna-se necessário fornecer o fator de conversão de mg/l para mEq/l. Embora os principais valores já tenham sido mapeados, em alguns casos, o usuário precisa fornecer o fator de conversão e determinar se deseja visualizar essas análises químicas e utilizá-las para o balanço iônico. Essa configuração é realizada por meio da aba "Configurar", cuja interface é observada na Figura 34. As análises mapeadas podem ser visualizadas na Tabela 2.

Figura 34 – Aba para configuração das análises químicas



Fonte: O autor (2023).

Tabela 2 - Fatores de conversão mapeados mg/l para mEq/l

Nome das Análises	Sigla	Fator de Conversão
Sódio (Na)	Na	0,0435
Potássio (K)	K	0,026
Cálcio (Ca)	Ca	0,0499

Magnésio (Mg)	Mg	0,823
Cloreto (Cl)	Cl	0,028169
Carbonato (CO ₃)	CO ₃	0,033
Alcalinidade de Bicarbonato	HCO ₃	0,0164
Sulfato (SO ₄)	SO ₄	0,0208

Fonte: Adaptado de (UNITSLAB, 2023).

Ocorre divergência nos nomes das análises químicas nos dados cadastrados. Por exemplo, alguns poços são cadastrados como análises de Brometo e outros como Bromo. O software soluciona essa divergência unificando as análises em uma única sigla, neste caso Br. Além disso, para calcular o balanço iônico é necessário identificar quais são os ânions, cátions e a condutividade elétrica. Essa especificação é indicada pela coluna denominada "Tipo", localizada na aba "Configurações" (Figura 34).

4.5.3 Balanço iônico

O balanço iônico é uma ferramenta essencial para compreender as características das águas subterrâneas. Baseia-se no princípio de que a concentração total de cátions na água deve ser equivalente ou muito próxima à dos ânions. Se houver uma discrepância significativa entre essas concentrações, isso pode sinalizar um erro na análise química ou a existência de íons que não foram detectados. A metodologia utilizada é a de Custódio e Lhamas (1983) onde o balanço iônico leva em conta o erro percentual, calculado por meio da Equação 1:

$$Ep\% = \frac{r\sum n - r\sum p}{\frac{1}{2}(r\sum n + r\sum p)} * 100 \quad (1)$$

O somatório dos cátions e ânions ocorre com as concentrações convertidas para mEq/l, onde os fatores de conversão e o tipo do íon foram determinados anteriormente na etapa de configuração. Após o cálculo, é utilizada a condutividade elétrica para determinar quais poços serão marcados como acima do erro máximo permitido, segundo Custódio e Lhamas (1983), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Erro teórico permitido segundo Custódio e Lhamas (1983)

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2000	>2000
Erro permitido (%)	30	10	8	4	<4

Fonte: Custódio e Lhamas (1983).

Os poços que excedem o erro máximo são destacados na aba "Balanço Iônico", sendo identificados pela cor vermelha, conforme ilustrado na Figura 35. Essa visualização permite identificar os poços que necessitam de atenção ou correção adicional, facilitando o processo de análise e validação dos dados.

Figura 35 – Aba do balanço iônico

Codigo	Somatório Cátions	Somatório Ânions	Erro Prático	Situação
2900020673	0,11107319999999...	0,190240000000...	52,54784722342071	Acima do Erro
2900020674	0,0663126	0,072488000000...	8,898232428390095	Abaixo do Erro
2900020675	0,0381911	0,048713350000...	24,21567595215207	Abaixo do Erro
2900020676	0,04111969999999...	0,0482138	15,88228380170934	Abaixo do Erro
2900020677	0,04778109999999...	0,06736456	34,01510747343844	Acima do Erro
2900020678	0,0957214	0,101844	6,198048848634433	Abaixo do Erro
2900020679	0,0660921	0,068880000000...	4,131075977924341	Abaixo do Erro
2900020680	0,0403544	0,08364	69,8186369707019	Acima do Erro
2900020681	0,0473575	0,047560000000...	0,42668633286803...	Abaixo do Erro
2900020682	0,08136489999999...	0,26401596	105,767910821694...	Acima do Erro
2900020683	0,0363751	0,056252000000...	42,9181092790339	Acima do Erro
2900020684	0,05032299999999...	0,047560000000...	5,64551556450045...	Abaixo do Erro
2900020685	0,1624685	0,1517	6,85523851054492	Abaixo do Erro
2900020686	0,0798523	0,084788	5,995737374142298	Abaixo do Erro
2900020687	0,15517889999999...	2,0588418	171,9643271627948	Acima do Erro
2900020688	0,10777439999999...	0,098564	8,927470601691196	Abaixo do Erro
2900020689	0,0533415	0,054776000000...	2,65359446898051...	Abaixo do Erro
2900021796	0,0390364	0,042968000000...	0	Ignorado
2900021797	0,06209129999999...	0,053628	14,6272920766025...	Abaixo do Erro
2900021798	0,06538069999999...	0,062484000000...	4,530883034958016	Abaixo do Erro
2900021799	0,0698395	0,102500000000...	37,90251219250376	Acima do Erro
2900021800	0,17103749999999...	0,211284	21,05374665039765	Abaixo do Erro
2900021801	0,12410079999999...	0,12792	3,03086094481092...	Abaixo do Erro
2900024869	0,07028599999999...	0,154816	75,1037307531697	Acima do Erro
2900024870	0,0617234	0,038704	45,84286758394621	Acima do Erro
2900024871	0,05202759999999...	0,05087577	2,238663320744486	Abaixo do Erro

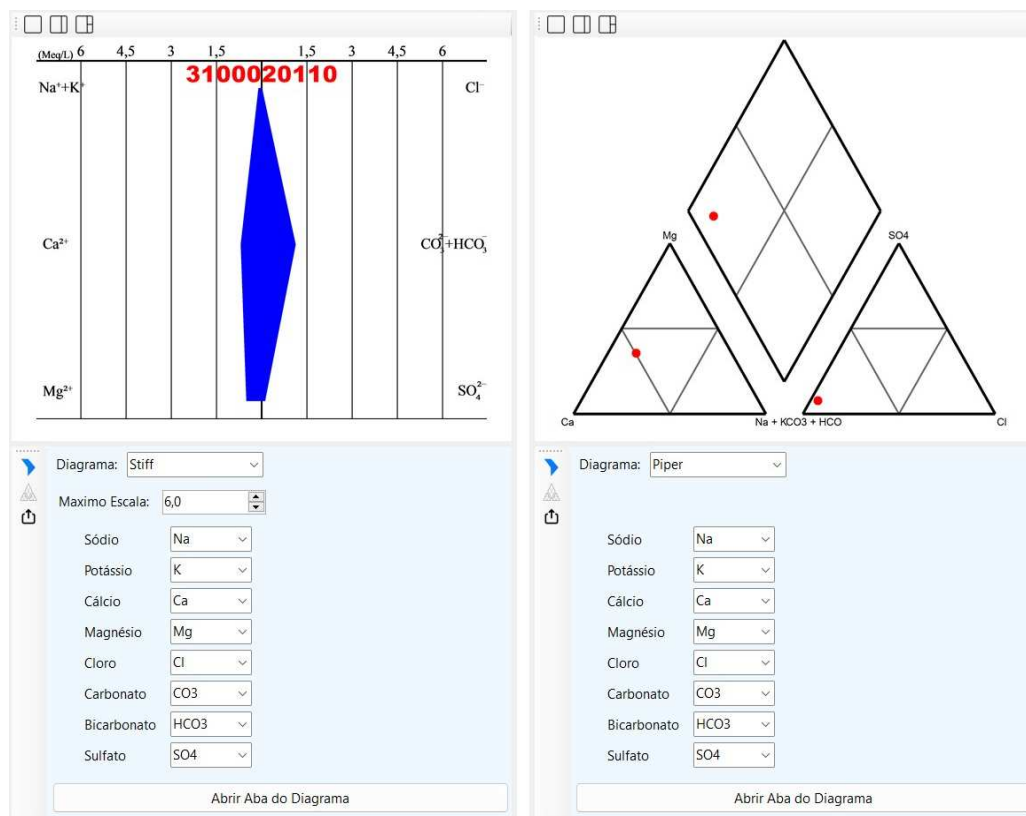
Fonte: O autor (2023).

4.5.4 Diagramas de *Piper* e *Stiff*

Os diagramas são ferramentas gráficas que permitem uma melhor compreensão e visualização da hidroquímica das águas subterrâneas. Eles permitem uma representação visual da composição química, facilitando a interpretação, comparação e visualização de padrões entre diferentes amostras de água. O programa incorporou os dois módulos de diagramas, *Piper* e *Stiff*, adaptados do software GDA (2020), com a implementação de algumas melhorias para otimizar o trabalho com os dados desses sistemas.

Para utilizar os diagramas é preciso informar as análises de sódio, potássio, cálcio, magnésio, cloro, carbonato, bicarbonato e sulfato. Essa função utiliza o sistema de siglas, onde o programa automaticamente mapeia as siglas que forem nomeadas como: Na, K, Ca, Cl, CO₃, HCO₃ e SO₄. Esse processo ocorre na aba lateral do programa, onde também é possível escolher e visualizar o diagrama para um poço individual selecionado na tabela. Essa aba é ilustrada na Figura 36.

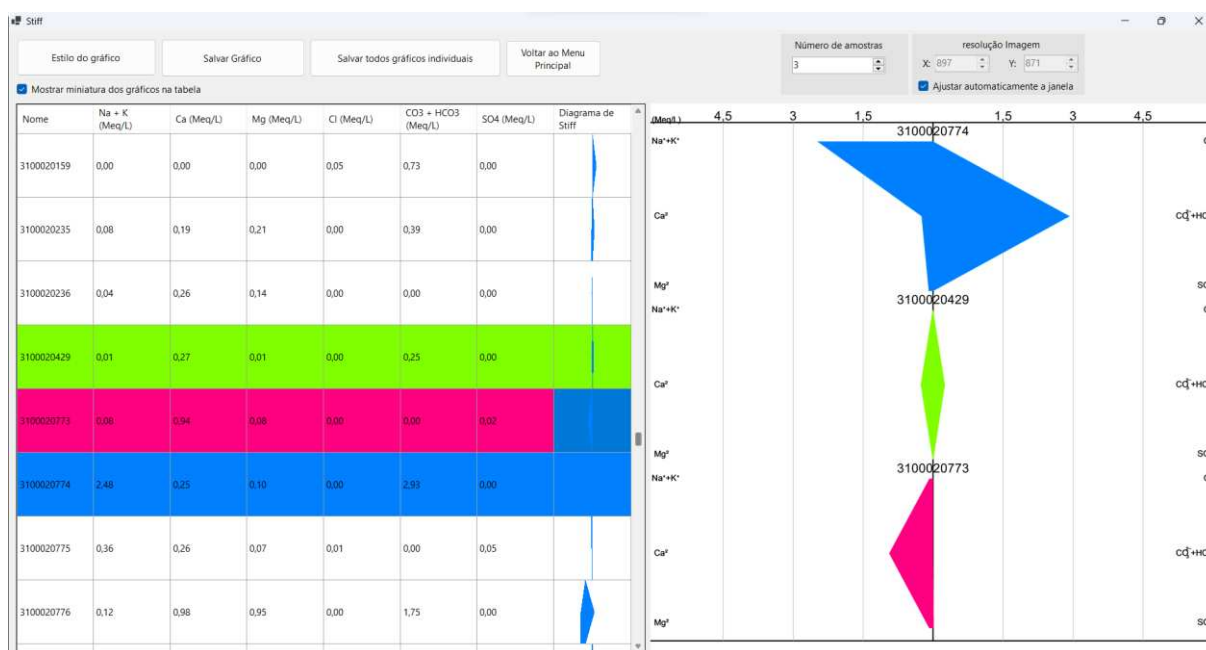
Figura 36 – Aba lateral para visualização dos diagramas de *Piper* e *Stiff*



Fonte: O autor (2023).

Nessa aba lateral é possível também abrir uma janela específica para os diagramas de *Piper* e *Stiff*. Nessa janela, são disponibilizadas as mesmas funcionalidades descritas no GDA (2020). Os dados são convertidos e enviados para essa janela, onde se torna possível visualizar, editar e exportar os diagramas. A Figura 37 demonstra a aba de funcionamento do diagrama de *Stiff*.

Figura 37 – Aba do diagrama de *Stiff*

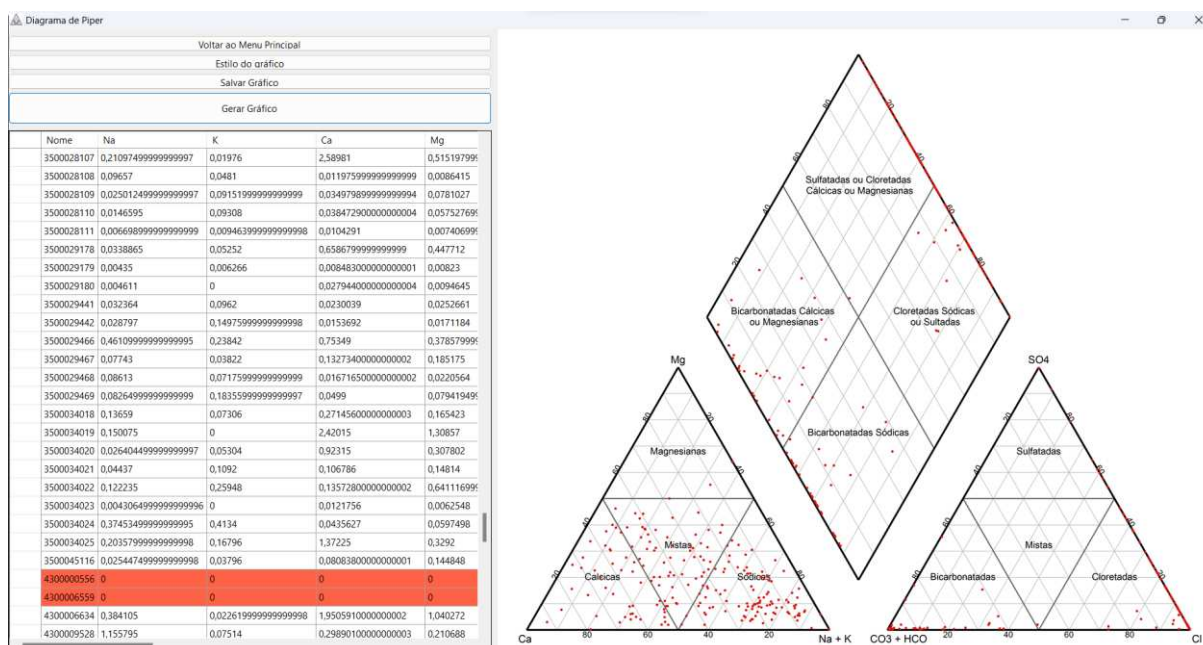


Fonte: O autor (2023).

A principal inovação em relação ao GDA (2020) reside na capacidade de visualizar na tabela, por meio da cor, qual amostra está sendo representada no gráfico, além de permitir, com um clique na tabela, adicionar ou remover as amostras do gráfico. Foi também introduzida a funcionalidade de modificar a resolução da imagem e o número de amostras diretamente na aba, eliminando a necessidade de acessar o painel de configurações. Essas melhorias facilitam a interação do usuário e a personalização da análise.

A aba referente ao diagrama de *Piper* também foi modificada em comparação ao GDA. As linhas da tabela onde não existem informações sobre cátions ou ânions são marcadas em vermelho, conforme ilustrado na Figura 38. Isso indica que tais poços são ignorados, uma vez que não possuem dados suficientes para serem representados no gráfico.

Figura 38 – Aba do diagrama de Piper



Fonte: O autor (2023).

4.6 API PARA VISUALIZAÇÃO DOS DADOS

O desenvolvimento da API foi realizado em *Python* utilizando o *framework FastAPI* e integrado com o banco de dados *MongoDB*. A API possui as seguintes funcionalidades:

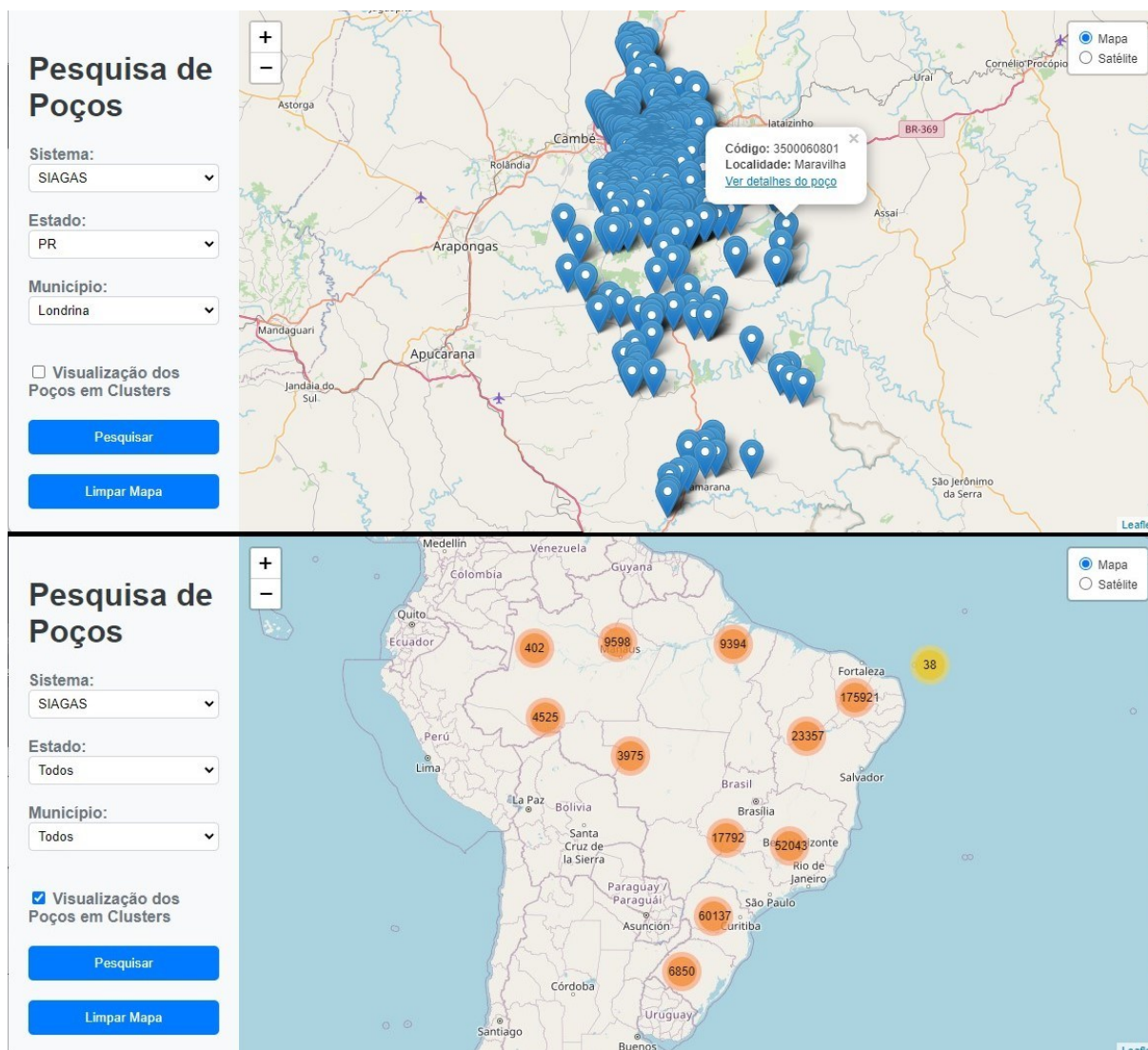
- **Listagem dos Sistemas:** A rota `GET /datasources` informa os sistemas cadastrados, fornecendo uma lista com fontes, como SIAGAS, IAT e RIMAS, facilitando a adição de novas fontes de informações de poços no futuro;
- **Consulta de Estados e Cidades:** As rotas `GET /{sistema}/states` e `GET /{sistema}/cities` facilitam a filtragem de dados geográficos, permitindo consultas específicas por estado ou cidade;
- **Pesquisa de Poços:** A rota `GET /{sistema}/search` oferece uma interface de pesquisa flexível para poços, aceitando diversos parâmetros de consulta, tais como filtragem por análises químicas e localidade, entre outros. Retorna uma lista com coordenadas, código e localidade dos poços que atenderem o filtro de pesquisa;

Relatório de Poço: A rota GET `/sistema/Poco/{código}` fornece as informações detalhadas do poço informado. O desenvolvimento da API possibilita sua utilização na criação de aplicações direcionadas ao monitoramento ambiental e à governança das águas subterrâneas. A estrutura e funcionalidade da API permitem a elaboração de relatórios personalizados, *dashboards* interativos e websites. Essas capacidades são fundamentais para fornecer informações acessíveis, contribuindo assim para uma governança mais informada por parte dos tomadores de decisões em áreas críticas relacionadas ao gerenciamento e proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

4.6.1 Website de visualização dos poços

Um website foi desenvolvido utilizando a biblioteca *Leaflet* para visualizar os poços em um mapa. Os dados obtidos por meio da API servem para ilustrar seu potencial no contexto de pesquisa. A integração da API ao website possibilita pesquisar e visualizar os poços, filtrando por sistema, estados e municípios. A fim de contornar potenciais problemas de desempenho associados a grandes volumes de poços e proporcionar novas formas de visualização das localizações, foi incorporada uma opção de visualização em agrupamentos (*clusters*). A Figura 39 exemplifica o website, exibindo a visualização dos poços tanto como pontos individuais quanto em *clusters*.

Figura 39 – Website para visualizar os poços de forma individual ou em *clusters*



Fonte: O autor (2023).

4.7 ESTUDO DE CASO: MONITORAMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE NITRATO EM ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO PARANÁ

A contaminação das águas subterrâneas por nitrato é responsável por causar impactos significativos tanto no meio ambiente quanto na saúde humana e animal. Além disso, a presença de nitrato nas águas pode atuar como um indicador de poluição, frequentemente associada a vazamentos na rede de esgoto ou ao uso inadequado de fertilizantes agrícolas (CTAS/CRH, 2019). Com a capacidade de permanecer nos aquíferos por décadas, o nitrato pode tornar a água imprópria para o

consumo humano se exceder o limite de $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ NO}_3^- - \text{N}$, estabelecido pelo Ministério da Saúde na Portaria Nº 888, de 4 de maio de 2021.

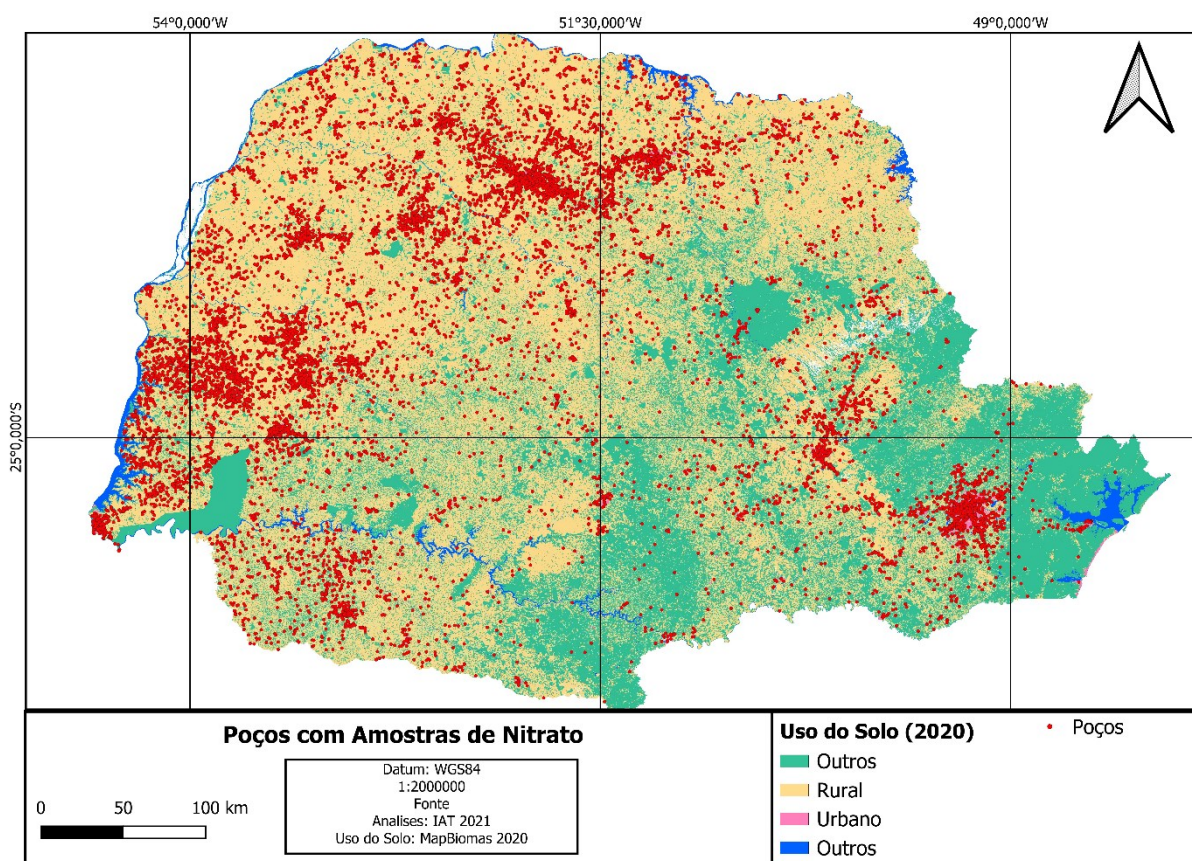
Nesse sentido, foi realizado um estudo de caso utilizando as informações disponíveis no banco de dados por meio do software desenvolvido neste trabalho para realizar o monitoramento de nitrato no estado Paraná. Foram coletadas informações de poços pertencentes ao IAT, como análises químicas, localização e dados construtivos dos poços no período de 1990 a 2020. A escolha do IAT ocorreu devido à disponibilidade de informações mais abrangentes sobre os poços, incluindo amostras de nitrato coletadas em diferentes períodos.

O estudo teve como objetivo também avaliar a correlação do nitrato com o uso do solo nas regiões com maior presença desse poluente. Para integração dos dados foi utilizado o software QGIS, possibilitando o processamento de 15.074 análises de nitrato, pertencentes a 14.704 poços tubulares profundos. O número de análises é maior que o número de poços porque alguns poços possuem análises em múltiplos anos. Em seguida, os resultados foram organizados por ano e classificados conforme as informações de uso do solo provenientes da Coleção 5.0 do MapBiomias. A distribuição geográfica desses poços no território estadual pode ser visualizada na Figura 40, onde também são destacadas as classes de uso do solo. Essas classes foram divididas em três categorias (urbano, rural e outros), conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Classes de uso do solo

Classificação do solo	Uso do solo MapBiomias
Urbano	Infraestrutura urbana
Rural	Agropecuária
Outros	Floresta, Formação natural não florestal, Área não vegetada e Corpo D'água

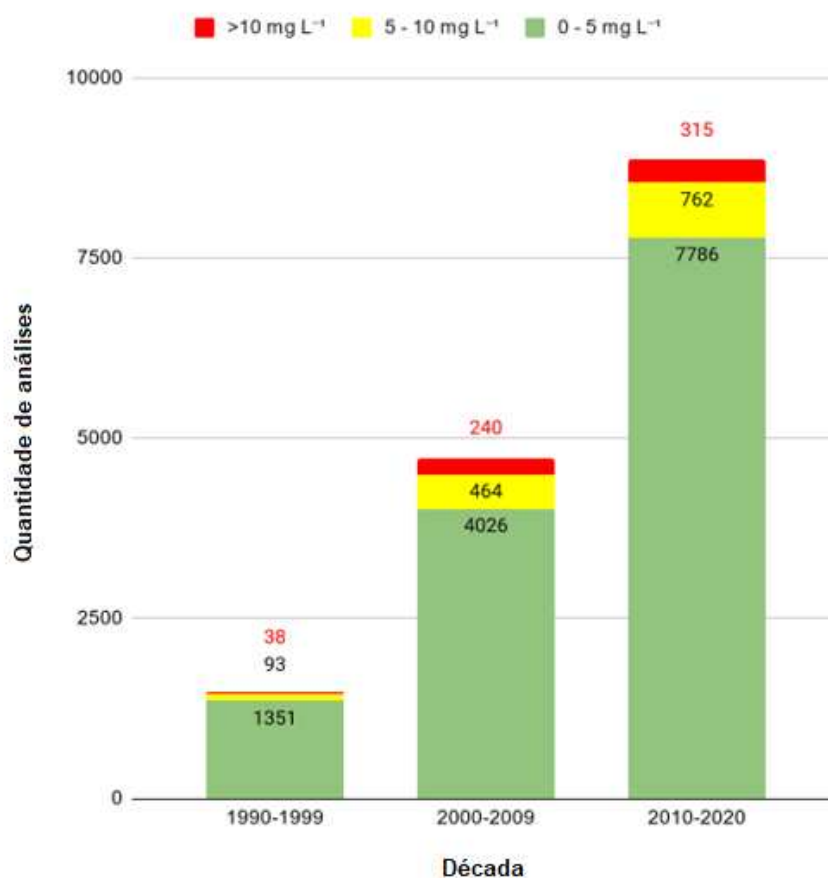
Fonte: O autor (2023).

Figura 40 – Mapa da distribuição de poços com nitrato no Paraná

Fonte: O autor (2023).

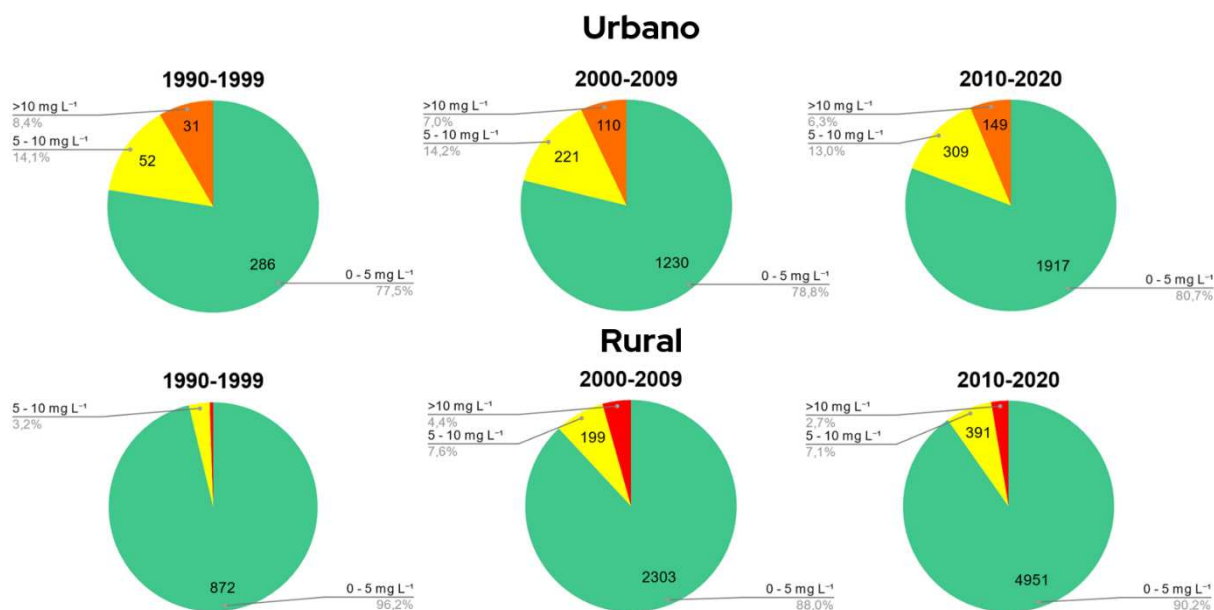
A avaliação realizada no período de 1990 a 2020 evidenciou um crescimento significativo no número de poços registrados que continham informações sobre a concentração de nitrato. Os dados revelaram 1.481 poços no intervalo de 1990-1999, 4.730 poços no período de 2000-2009, e 8.863 poços na década de 2010-2020. Quanto ao uso da terra, 60% dos poços foram classificados como agricultura, 28,7% como infraestrutura urbana e 11,3% como outros. Todas as análises de nitrato realizadas nos poços foram expressas como: $NO_3^- - N$.

As análises foram divididas em três grupos de potabilidade: amostras acima do limite legal de 10 mg L⁻¹; amostras entre 10 mg L⁻¹ e 5 mg L⁻¹, sendo esse importante, como descrito por Silva et al. (2019), por ser indicativo de contaminação antrópica; e o terceiro grupo com amostras com menos de 5 mg L⁻¹. As análises de nitrato realizadas entre diferentes décadas, e o limite de potabilidade, podem ser visualizadas na Figura 41.

Figura 41 – Níveis de nitrato no Paraná e grupos de potabilidade

Fonte: O autor (2023).

O percentual de poços que apresentaram valores de concentração de nitrato acima do permitido pela legislação vigente foi dividido da seguinte forma: 2,6% no intervalo de 1990-1999; 5,1% no período de 2000-2009; e 3,6% na década de 2010-2020. Com relação ao uso do solo, os poços que excederam o limite de potabilidade representam 2,9% daqueles situados em área rural, 6,7% em áreas urbanas e 2,17% em outras categorias de uso de solo. A Figura 42 demonstra a distribuição das análises de nitrato entre os poços urbanos e rurais.

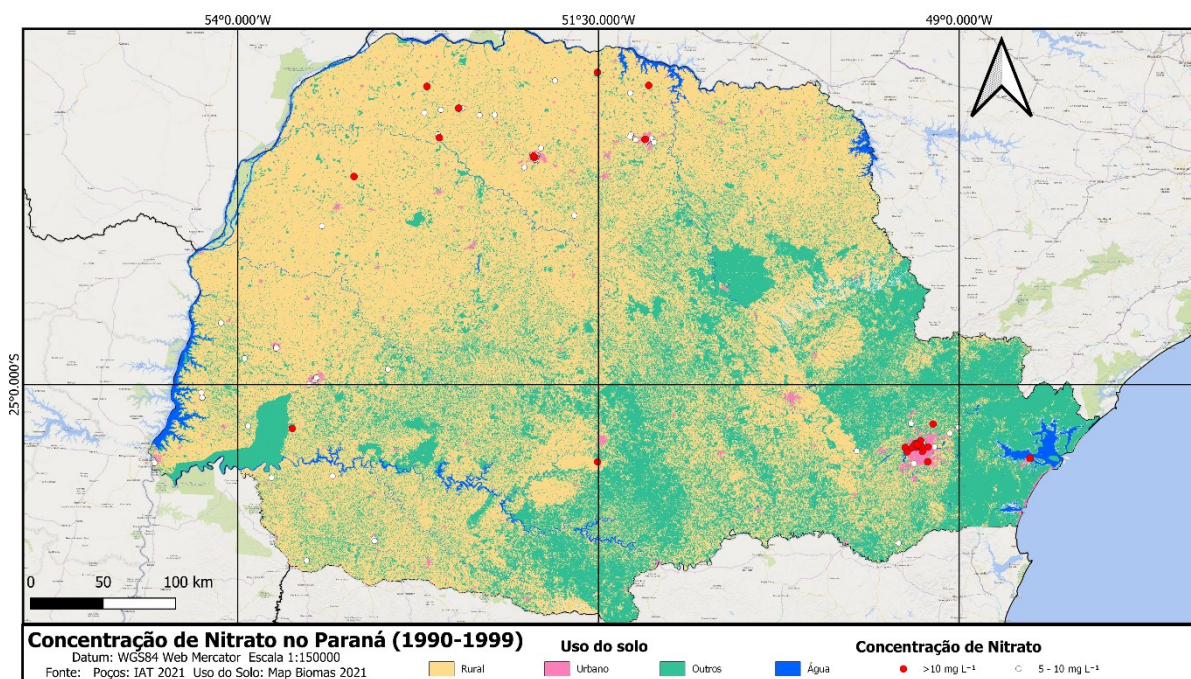
Figura 42 – Distribuição das análises de nitrato no uso do solo urbano e rural

Fonte: O autor (2023).

As principais fontes de poluição por nitrato em países em desenvolvimento, como o Brasil, variam entre regiões rurais e urbanas. Nas regiões rurais, a contaminação é predominantemente atribuída ao uso de fertilizantes, à falta de saneamento adequado e à pecuária intensiva. Em contraste, nas áreas urbanas, a poluição por nitrato é frequentemente causada pela contaminação por meio da percolação de esgoto, resultante de fossas mal construídas e vazamentos nas redes coletoras de esgoto (SANTOS; SILVA, 2021).

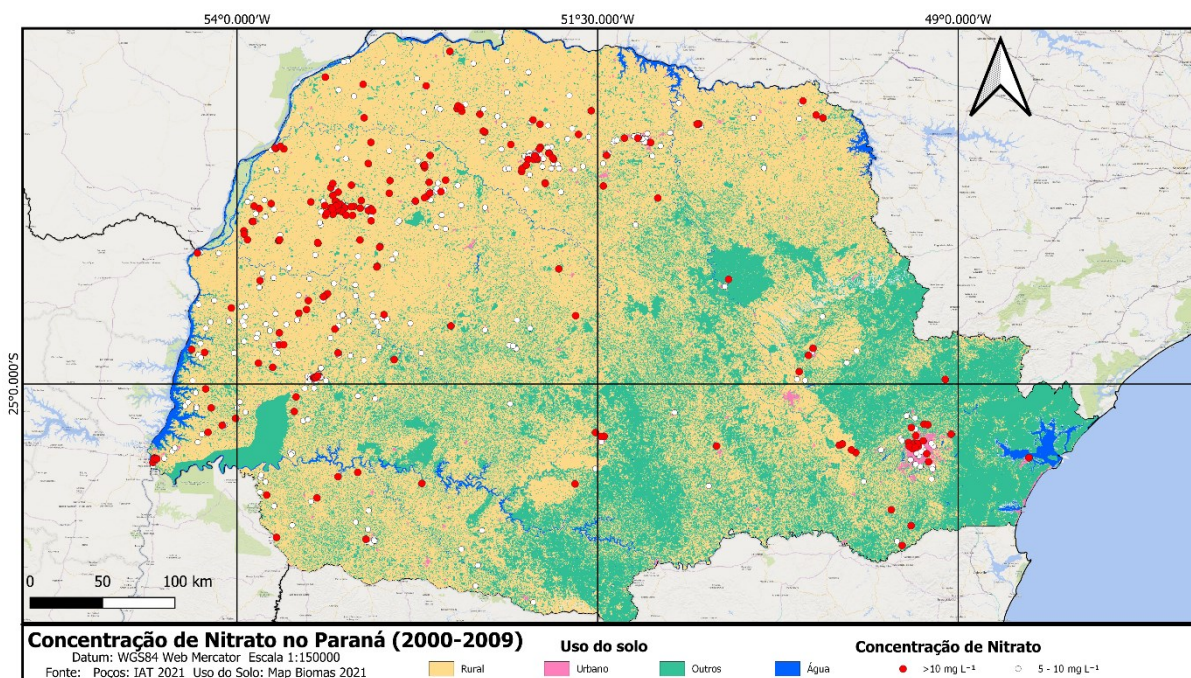
Conforme ilustrado na Figura 42, os poços situados na área urbana revelaram uma contaminação proporcionalmente maior por nitrato em comparação com aqueles localizados nas regiões rurais. Essa contaminação na área urbana é bem visível nos grandes centros populacionais do estado. Tal distribuição e intensidade da contaminação podem ser mais claramente observadas nas Figuras 43 a 45, que demonstram os poços situados próximos e acima do limite de potabilidade nas três décadas avaliadas.

Figura 43 – Níveis de nitrato no Paraná entre 1990 e 1999

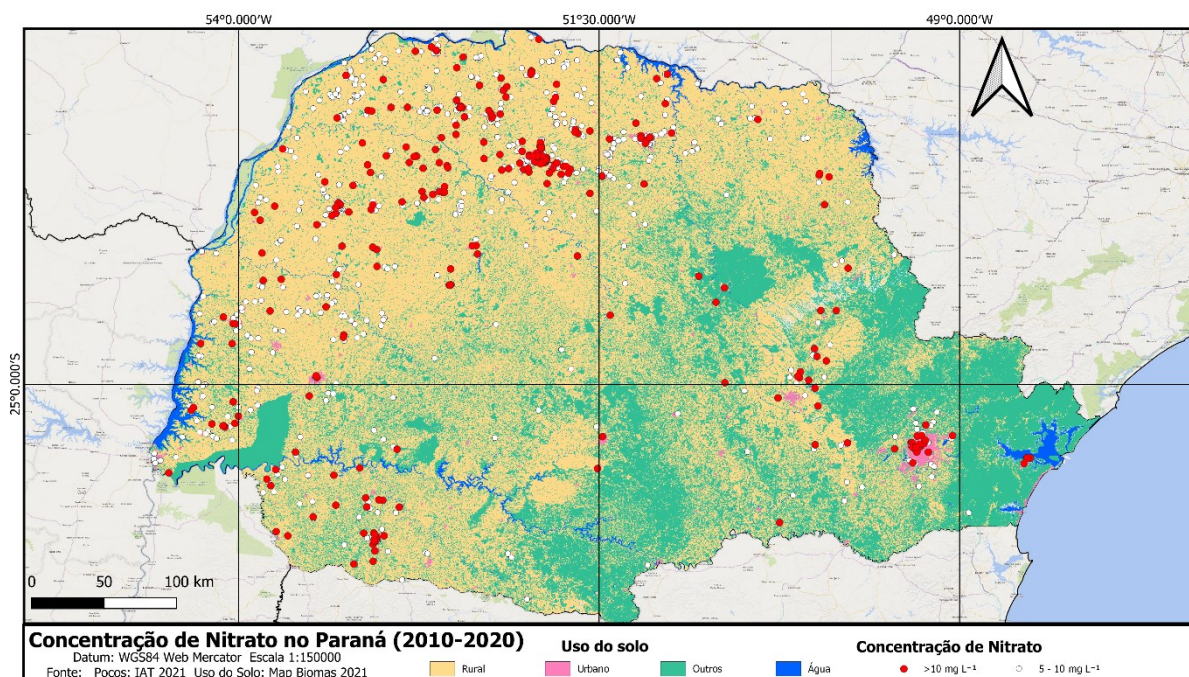


Fonte: O autor (2023).

Figura 44 – Níveis de nitrato no Paraná entre 2000 e 2009



Fonte: O autor (2023).

Figura 45 – Níveis de nitrato no Paraná entre 2010 e 2020

Fonte: O autor (2023).

No Estado do Paraná existe uma cobertura de esgoto superior 80% e os maiores municípios do estado tem cobertura próxima a 100% de esgoto (SNSA; SNIS, 2022). Portanto, é provável que a presença de nitrato seja atribuída a contaminações antigas e vazamentos nas redes de esgoto, particularmente em decorrência da tubulação antiga. Esse fenômeno é corroborado por um estudo realizado no município paulista de Urânia por HIRATA et al. (2020). Apesar de o município possuir uma cobertura de rede sanitária de 98%, ainda foi observada contaminação por nitrato. Notavelmente, a contaminação foi maior na parte antiga da cidade, atribuída às fossas existentes antes da instalação da rede sanitária e aos vazamentos em canos de cerâmica. Esses vazamentos são menos comuns em canos de PVC, que são utilizados atualmente.

Assim, são necessárias medidas preventivas desse poluente, especialmente nos municípios do terceiro planalto do Paraná, onde existe um alto número de poços com nitrato acima do limite permitido. Dessa forma, o presente estudo demonstra a importância do monitoramento do nitrato nas águas subterrâneas do Paraná, enfatizando assim, a necessidade de uma gestão pública eficiente voltada para a preservação dos recursos hídricos.

5 CONCLUSÃO

Em virtude do desenvolvimento do software, o acesso às informações sobre águas subterrâneas de diversas fontes, como IAT, RIMAS e SIAGAS, foi simplificado e automatizado. O sistema unificou a coleta, armazenamento e disponibilização das informações dos poços em um único local, criando uma plataforma integrada e acessível. Esse fator permitiu que usuários, mesmo sem conhecimento em programação e coleta de dados, possam acessar e utilizar as informações de maneira eficiente para suas pesquisas.

A implementação de uma interface visual nos softwares desenvolvidos eliminou a necessidade de o usuário possuir conhecimento em linguagens de programação. Especificamente, o processo de coleta de dados foi simplificado de tal forma que não requer que o usuário tenha conhecimentos em linguagens como *Python* ou em processos como *web scraping*. Além disso, o software para a análise de poços cadastrados no banco de dados permite que o usuário construa diagramas importantes para as análises de águas subterrâneas, como *Stiff* e *Piper*. Essas ferramentas gráficas são fundamentais para a interpretação e compreensão das características químicas das águas.

Outra implementação relevante é o cálculo do balanço iônico, que pode ser realizado diretamente dentro do software. Entretanto, para aqueles usuários que preferem trabalhar com ferramentas específicas, o software também oferece a opção de exportar esses dados para outros sistemas com os quais estejam mais familiarizados. Essas funcionalidades e a flexibilidade de exportação tornam o software uma ferramenta versátil e adaptável.

Nesse sentido, o estudo de caso de monitoramento da concentração de nitrato no estado do Paraná demonstrou uma das possíveis aplicações do software desenvolvido, dentre diversas outras, como o monitoramento de nível d'água, profundidade de poços e nível de compostos químicos na água.

Além disso, o acesso às informações governamentais para estudos de águas subterrâneas apresenta diversas dificuldades que o software desenvolvido neste trabalho buscou superar. Entre essas dificuldades, destaca-se a incapacidade de realizar o *download* de análises químicas nos *websites* do SIAGAS e RIMAS, uma limitação que pode restringir a profundidade e abrangência da pesquisa. Adicionalmente, a obtenção de dados do IAT é particularmente desafiadora, uma vez

que essas informações estão desatualizadas e só podem ser obtidas via *FTP*. Esse método de acesso pode ser inacessível para pesquisadores, especialmente aqueles que não possuem conhecimento em computação.

Dessa forma, os softwares desenvolvidos, demonstraram ser uma ótima ferramenta para realizar a coleta de dados diretamente de fontes como SIAGAS, RIMAS e IAT, armazená-los no banco de dados e realizar diversas análises. A capacidade de integrar diagramas, tabelas, mapas e outras funções analíticas em uma única ferramenta representa uma inovação significativa, pois essas funções geralmente não são encontradas em uma única plataforma. Com isto, espera-se que o software desenvolvido auxilie na superação de barreiras de acesso e manipulação de dados, atuando como uma ferramenta para auxiliar os pesquisadores em seus estudos voltados para a compreensão hidrogeológica e ambiental de aquíferos.

REFERÊNCIAS

ALMAGRO, André; OLIVEIRA, Paulo Tarso S.; MEIRA NETO, Antônio Alves; ROY, Tirthankar; TROCH, Peter. CABra: A novel large-sample dataset for Brazilian catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 25, nº 6, p. 3105–3135, 9 jun. 2021. <https://doi.org/10.5194/HESS-25-3105-2021>.

ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2022 - Informe Anual**. Brasília, 2023.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura de recursos hídricos no Brasil 2021: Reporte Pleno**. Brasília, 2021. Disponível em: <https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/>.

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017 : relatório pleno**. Brasília, 2017.

ASHRAF, ALameer. Data visualization using Power BI and MongoDB. 2019. Disponível em: <https://medium.com/@alameerashraf/data-visualization-using-power-bi-and-mongodb-e694328220b5>. Acessado em: 14 mar. 2022.

BALDWIN, Claudia; TAN, Poh Ling; WHITE, Ian; HOVERMAN, Suzanne; BURRY, Kristal. How scientific knowledge informs community understanding of groundwater. **Journal of Hydrology**, vol. 474, p. 74–83, 12 dez. 2012. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.06.006>.

BRADSHAW, Shannon; BRAZIL, Eoin; CHODOROW, Kristina. **MongoDB: the definitive guide: powerful and scalable data storage**. O'Reilly Media, 2019.

CETESB, COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo**. São Paulo, 2020.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. . Hidrologia subterrânea. 2ª ed., Barcelona: Ed. Omega, 1983.

Disponível em: <https://www.academia.edu/41067940/Custodio_Llamas_Tomo>

BRASIL. **Portaria Nº 888, de 4 de Maio de 2021**. Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. **Sistema de informações de águas subterrâneas - SIAGAS. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais**. Disponível em:
<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php>

BRASIL. **Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas- RIMAS. Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais**. Disponível em: <
https://rimasweb.sgb.gov.br/layout/pesquisa_complexa.php?rimas=true>

CONICELLI, Bruno Pirilo; HIRATA, Ricardo. NOVOS PARADIGMAS NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Águas Subterrâneas**, 2017.

CTAS/CRH, Câmara Técnica de Águas Subterrâneas/Conselho Estadual de Recursos Hídricos. **NITRATO NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: DESAFIOS FRENTE AO PANORAMA ATUAL**, 2019. Disponível em:
https://smastr16.blob.core.windows.net/igeo/2020/01/boletim_ig_nitrato.pdf.
Acessado em: 27 fev. 2022.

DÖLL, P.; HOFFMANN-DOBREV, H.; PORTMANN, F. T.; SIEBERT, S.; EICKER, A.; RODELL, M.; STRASSBERG, G.; SCANLON, B. R. Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. **Journal of Geodynamics**, vol. 59–60, p. 143–156, 1 set. 2012.
<https://doi.org/10.1016/J.JOG.2011.05.001>.

ECE, ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. **Guidelines for Developing National Strategies to Use Air and Water Quality Monitoring as Environmental Policy Tools**. New York and Geneva, 2012.

ECMA INTERNATIONAL. The JSON Data Interchange Syntax. **Standard ECMA-404**, vol. 2nd Editio, nº December 2017, p. 8, 2017.

ELMASRI, Ramez; NAVATHE, Shamkant B. **Sistema de Banco De Dados**. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2006.

EPA, U.S. Environmental Protection Agency. Types of Drinking Water Contaminants | US EPA. 2021. Disponível em: <https://www.epa.gov/ccl/types-drinking-water-contaminants>. Acessado em: 15 dez. 2021.

FAMIGLIETTI, J. S. The global groundwater crisis. **Nature Climate Change** 2014 **4:11**, vol. 4, nº 11, p. 945–948, 29 out. 2014. <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>.

FAMIGLIETTI, James S.; FERGUSON, Grant. The hidden crisis beneath our feet. **Science**, vol. 372, nº 6540, p. 344–345, 23 abr. 2021. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABH2867>.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Framework for Action: to achieve the vision on groundwater governance**. FAO, 2016.

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture: Managing systems at risk**. New York: The Food and Agriculture Organization of the United Nations and Earthscan, 2011.

FARIAS, Ana Lizete; SOARES, Daniela Nogueira; FREITAS, Diego Franca; ARROYO, Eveline Maria Vasquez; KUWAJIMA, Júlio Issao; BRONZATTO, Luiz Augusto; CUCIO, Maíra Simões; FECHINE, Valéria Maria Rodrigues. Diálogos sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e os Desafios para a Gestão da Água e do Saneamento no Brasil. nº 8, 2018.

FREDDO, Valmor. **RELATÓRIO SIAGAS 2020 : “Coleta, Consistência, Armazenamento e Difusão de Informações Hidrogeológicas”**. 2020.

GARTHWAITE, Josie. Overpumping groundwater increases contamination risk | Stanford News. **Stanford News**, 2018.

GARTNER. Definition of Analytics and Business Intelligence (ABI) - IT Glossary | Gartner. 2022. Disponível em: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/business-intelligence-bi>. Acessado em: 14 mar. 2022.

GEF, Global Environment Facility. **Global Diagnostic on Groundwater Governance**. Delft, Holanda, 2015.

GENARO, Daniele Tokunaga. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS): relatório de acompanhamento das atividades, 2020.

GONÇALVES, Roger D.; STOLLBERG, Reiner; WEISS, Holger; CHANG, Hung K. Using GRACE to quantify the depletion of terrestrial water storage in Northeastern Brazil: The Urucuia Aquifer System. **Science of The Total Environment**, vol. 705, p. 135845, 25 fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.135845>.

GRANZIERA, Maria Luiza Machado; GRANZIERA, Beatriz Machado. DESAFIOS NA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Águas Subterrâneas**, 2015.

HAGER, Francis Priscilla Vargas; SILVA, José de Ribamar da Costa; ALMEIDA, Wesley Machado de Almeida; OLIVEIRA, Wilton de Arruda Oliveira. A PROBLEMÁTICA DA GESTÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO BRASIL. **Águas Subterrâneas**, 26 jul. 2002.

HIRATA, Ricardo; CAGNON, Fabiana; BERNICE, Aline; MALDANER, Carlos Henrique; GALVÃO, Paulo; MARQUES, Carlos; TERADA, Rafael; VARNIER, Claudia; RYAN, M. Cathryn; BERTOLO, Reginaldo. Nitrate contamination in brazilian urban aquifers: A tenacious problem. **Water (Switzerland)**, vol. 12, nº 10, p. 1–20, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12102709>.

HIRATA, Ricardo; SUHOGUSOFF, Alexandra; SUSKO, Silvana; PILAR, Marcellini; VILLAR, Carolina; MARCELLINI, Laura. As águas subterrâneas e sua importância ambiental e econômica para o Brasil , p. 64, 2019. <https://doi.org/10.11606/9788563124074>.

HTML AGILITY PACK. 2023. Disponível em: <https://html-agility-pack.net/>. Acessado em: 10 jun. 2023.

IAT -INSTITUTO DE ÁGUA E TERRA. Dados de Poços: IAT, 2023. Disponível em: ftp://geo_iat:geo_iat@200.189.114.112. Acesso em: 01 jun 2023.

IGAM, Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Qualidade das Águas Subterrâneas - Apresentação. 2018. Disponível em: <http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/sem-categoria/359-monitoramento-da-qualidade-das-aguas-subterraneas>. Acessado em: 8 dez. 2021.

IGRAC, International Groundwater Resources Assessment Centre. Global Groundwater Monitoring Network (GGMN). 2021. Disponível em: <https://www.un-igrac.org/special-project/ggm-global-groundwater-monitoring-network>. Acessado em: 8 dez. 2021.

JASECHKO, Scott; PERRONE, Debra. Global groundwater wells at risk of running dry. **Science**, vol. 372, nº 6540, p. 418–421, 23 abr. 2021. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABC2755>.

JSON. 2023. Disponível em: <https://www.json.org/json-en.html>. Acessado em: 10 jun. 2023.

LALL, Upmanu; JOSSET, Laureline; RUSSO, Tess. Annual Review of Environment and Resources A Snapshot of the World's Groundwater Challenges. **Annual Review of Environment and Resources**, 2020. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017>.

LI, Peiyue; KARUNANIDHI, D.; SUBRAMANI, T.; SRINIVASAMOORTHY, K. Sources and Consequences of Groundwater Contamination. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, vol. 80, nº 1, p. 1–10, 1 jan. 2021. <https://doi.org/10.1007/S00244-020-00805-Z/FIGURES/2>.

LOURENCETTI, Josiane; FARIA, Glaucia Amorim; FELIZARDO, Lucas Menezes; PRATES, Marcelo Marconato; OLIVEIRA, Jefferson Nascimento de. Decreased level potentiometric Bauru aquifer causes and quantification. **Research, Society and Development**, vol. 9, nº 10 SE-, p. e8939109303, 24 out. 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.9303>.

MDN. API - Glossário | MDN. 2021. **Mozilla Foundation**. Disponível em: <https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Glossary/API>. Acessado em: 21 mar. 2022.

MESQUITA, Luis Fabio Gonçalves. Os comitês de bacias hidrográficas e o gerenciamento integrado na Política Nacional de Recursos Hídricos. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, vol. 45, nº 0, p. 56–80, 30 abr. 2018. <https://doi.org/10.5380/DMA.V45I0.47280>.

MICROSOFT. O que é Power BI? - Power BI | Microsoft Docs. 2022. Disponível em: <https://docs.microsoft.com/pt-br/power-bi/fundamentals/power-bi-overview>. Acessado em: 14 mar. 2022.

MICROSOFT. Web API design best practices. Azure Architecture Center, 2023. Disponível em: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/architecture/best-practices/api-design>. Acessado em: 30 de Set. 2023.

MIGUEZ, Pedro Henrique Gongora. **Desenvolvimento de um software para classificação hidroquímica de águas subterrâneas**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2020.

MONGODB, Inc. What is the MongoDB Connector for BI? — MongoDB Connector for BI. 2021. Disponível em: <https://docs.mongodb.com/bi-connector/current/what-is-the-bi-connector/>. Acessado em: 14 mar. 2022.

R. FIELDING, Ed; J. RESCHKE, Ed. **RFC 7231: Hypertext Transfer Protocol (HTTP/1.1): Semantics and Content**. Internet Engineering Task Force (IETF), 2014.

RAMÍREZ, Sebastián. FastAPI. 2022. Disponível em: <https://fastapi.tiangolo.com/>. Acessado em: 21 mar. 2022.

RAU, Gabriel C.; CUTHBERT, Mark O.; POST, Vincent E.A.; SCHWEIZER, Daniel; ACWORTH, R. Ian; ANDERSEN, Martin S.; BLUM, Philipp; CARRARA, Elisabetta; RASMUSSEN, Todd C.; GE, Shemin. Future-proofing hydrogeology by revising groundwater monitoring practice. **Hydrogeology Journal**, vol. 28, nº 8, p. 2963–2969, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02242-7>.

RICHEY, Alexandra S.; THOMAS, Brian F.; LO, Min Hui; REAGER, John T.; FAMIGLIETTI, James S.; VOSS, Katalyn; SWENSON, Sean; RODELL, Matthew. Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. **Water Resources Research**, vol. 51, nº 7, p. 5217–5238, 1 jul. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015WR017349>.

SANTOS, Larissa Maiara da Fonseca; SILVA, Rosângela Aguilar da. Nitrato em águas subterrâneas: Um alerta sobre os riscos à saúde. **BEPA. Boletim Epidemiológico Paulista**, vol. 18, nº 216, p. 46–57, 31 dez. 2021. DOI 10.57148/BEPA.2021.V.18.37269. Disponível em: <https://periodicos.saude.sp.gov.br/BEPA182/article/view/37269>. Acessado em: 19 ago. 2023.

SILVA, Rosângela Aguilar da; SANTOS, Roberto Costa; FERREIRA, Luci Ochi. Avaliação da concentração de nitrato em águas subterrâneas de poços das regiões de Assis e Marília, São Paulo. **Vigil Sanit Debate, Rio de Janeiro**, vol. 7, nº 2, p. 102–106, 31 maio 2019. DOI 10.22239/2317-269x.01290. Disponível em: <https://visaemdebate.incqs.fiocruz.br/index.php/visaemdebate/article/view/1290>. Acessado em: 19 ago. 2023.

SILVA, Márcia Cristina de Alcântara; SANTOS, Kelson Ribeiro dos; NEUMANN, Geofísico Odirlei. **QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DE MATO GROSSO DO SUL : Relatório de implementação da rede de monitoramento**. Campo Grande, MS, 2021.

SNSA, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental; SNIS, Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento. **Diagnóstico Temático - Gestão Técnica de Esgoto ano de referência 2021**. Brasília, ago. 2022.

THE GROUNDWATER PROJECT. The Importance of Spreading Groundwater Knowledge - The Groundwater Project. 2022. Disponível em: <https://gw-project.org/the-importance-of-spreading-groundwater-knowledge/>. Acessado em: 4 mar. 2022.

United Nations. **2.4.1 Agricultural sustainability | Sustainable Development Goals | Food and Agriculture Organization of the United Nations**. 2018. Disponível em: <https://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/642/en/>. Acessado em: 1 dez. 2021.

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing water**: UNESCO, 2021.

UNITED NATIONS - WATER. **Summary Progress Update 2021 : SDG 6 — water and sanitation for all**, 2021.

UNITED NATIONS. DESA. World population prospects 2019 - Highlights.
Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects 2019., n° 141, p. 1–39, 2019.

VERA-OLIVERA, Harley; GUO, Ruizhe; HUACARPUMA, Ruben Cruz; DA SILVA, Ana Paula Bernardi; MARIANO, Ari Melo; HOLANDA, Maristela. Data Modeling and NoSQL Databases-A Systematic Mapping Review. **ACM Computing Surveys (CSUR)**, vol. 54, n° 6, p. 1–26, 2021.

WANG, Jin; CHEN, Min; LÜ, Guonian; YUE, Songshan; WEN, Yongning; LAN, Zhenxu; ZHANG, Shuo. A data sharing method in the open web environment: Data sharing in hydrology. **Journal of Hydrology**, vol. 587, p. 124973, 1 ago. 2020.
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2020.124973>.

WHO, World Health Organization. **Protecting Groundwater for Health: Managing the Quality of Drinking-water Sources**. [S. l.: s. n.], 2006.

WIJNEN, Marcus; AUGÉARD, Benedicte; HILLER, Bradley; WARD, Christopher; HUNTJENS, Patrick. Managing the Invisible : Understanding and Improving Groundwater Governance. **water papers**, vol. draft repo, n° June, p. 174, 2012.

WORLD HEALTH ORGANISATION. Guidelines for drinking-water quality, 4th edition: 1st addendum. **World Health Organization**, n° April 2017, p. 1–4, 2017.