

RELAÇÕES ENTRE O USO DO SOLO E A DISTRIBUIÇÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE NITRATO NO AQUÍFERO URBANO DO MUNICÍPIO DE BAURU, SP

Fernanda Souto BARRETO

Deborah LOOKIN

Claudia VARNIER

Alexandra SUHOGUSOFF

Luiz Carlos FERRARI

Tatiana TAVARES

José Luiz ALBUQUERQUE FILHO

Fabiano TOFFOLI

Rosângela Pacini MODESTO

Reginaldo BERTOLO

Ricardo HIRATA

RESUMO

Este trabalho analisou a contaminação por nitrato no Sistema Aquífero Bauru (SAB) na área urbana do município homônimo, relacionando sua ocorrência com a urbanização. A metodologia utilizada incluiu: i) cadastro e tratamento de dados hidroquímicos de 634 poços tubulares; ii) levantamento da evolução do esgotamento sanitário desde 1976 a 2022; iii) análise do uso e ocupação do solo; e iv) avaliação da evolução das concentrações de nitrato entre 1999 e 2022. A análise das concentrações recentes de nitrato em 151 amostras de águas subterrâneas, provenientes de 76 poços selecionados, permitiu identificar concentrações de até 23 mg/L N-NO₃⁻, que se distribuem, sobretudo, na região central da cidade, ocupada entre 1910 e 1980, com esgotamento sanitário mais antigo (anterior a 1976) e densidade de ocupação urbana de média a alta. Tendências de aumento nos valores das medianas (*Md*) das concentrações de nitrato foram observadas, de 0,20 a 3,29 mg/L N-NO₃⁻. As análises estatísticas entre as concentrações de nitrato, idades da mancha urbana e da rede de esgoto, densidade de ocupação urbana e profundidade dos poços mostraram que a urbanização e o saneamento controlam a presença desse contaminante no aquífero.

Palavras-chave: Aquífero urbano; Nitrato; Água subterrânea; Saneamento.

ABSTRACT

LAND USE AND THE DISTRIBUTION OF NITRATE CONCENTRATIONS IN THE URBAN AQUIFER OF THE BAURU CITY, SP. This work analyzed nitrate contamination in the Bauru Aquifer System (BAS) in the urban area of the municipality of the same name and related its occurrence with urbanization. The methodology used included: i) record and treatment of hydrochemical data from 634 drilling wells; ii) survey of the evolution of sewage network from 1976 to 2022; iii) analysis of land use and occupation; and iv) evaluation of the nitrate concentrations between 1999 and 2022. The seasonal evaluation of recent nitrate concentrations in 151 groundwater samples from 76 selected drilling wells allowed identifying

concentrations up to 23 mg/L N-NO₃⁻, whose values are mainly distributed in the central region of the urban area, occupied between 1910 and 1980, with older sewage system (before 1976), and urban occupation density, from medium to high. An increase trend in median nitrate concentration (*Md*) values was observed, from 0.20 to 3.29 mg/L N-NO₃⁻. The statistical analysis between nitrate concentrations, the ages of the urban area and the sewage network, the urban occupancy density, and well depth showed that the urbanization and sanitation affect the presence of this contaminant in the aquifer.

Keywords: Urban aquifer; Nitrate; Groundwater; Sanitation system.

1 INTRODUÇÃO

A ocupação e a atividade antrópica geram impactos na qualidade das águas subterrâneas em centros urbanos, causando sérios prejuízos ambientais, sociais e econômicos. Dentre os contaminantes gerados nos aquíferos sob as cidades, destaca-se o nitrato, considerado um importante indicador de contaminação e cuja ocorrência atribui-se principalmente a fugas das redes de esgoto e à disposição de efluentes *in situ* (fossas rudimentares e sépticas).

A rápida urbanização e o aumento populacional nas últimas décadas têm contribuído de forma significativa para a degradação acelerada dos aquíferos, o que tem gerado uma preocupação mundial devido aos potenciais danos à saúde da população. Diversos estudos foram desenvolvidos para identificar e avaliar a extensão da contaminação por nitrato nas cidades (VARNIER *et al.* 2010, SUHOGUSOFF *et al.* 2013, ZENDEHBAD *et al.* 2019, HIRATA *et al.* 2020, TORRES-MARTÍNEZ *et al.* 2020, PILEGGI *et al.* 2021, JAKÓBCZYK-KARPIERZ & SLÓSARCZYK 2022, REDDY *et al.* 2022).

Grande parte dos centros urbanos paulistas apresenta, em diferentes graus, contaminação dos aquíferos por nitrato (VARNIER *et al.* 2021), o que é corroborado pelo monitoramento de qualidade da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que, desde 1990, tem detectado um aumento sistemático nas concentrações desse nutriente nas águas subterrâneas (CETESB 2022).

Ao examinar 840 amostras de água de poços de abastecimento público dos principais sistemas aquíferos paulistas (Cristalino, Tubarão, Guarani, Serra Geral, Bauru e Taubaté), distribuídos em todo o território do Estado de São Paulo, STRADIOTO *et al.* (2019) constataram que em 8,4% as águas não eram potáveis para nitrato, conforme padrão estabelecido pela Portaria GM/MS n.º 888 do

Ministério da Saúde (BRASIL 2021) de 10 mg/L N-NO₃⁻. E para 18,9% das amostras, os resultados ultrapassavam o Valor de Alerta (VA), igual a 5-10 mg/L N-NO₃⁻, definido pela CETESB (2004) em suas ações de prevenção e controle à contaminação. A maioria desses valores foi encontrada no Sistema Aquífero Bauru (SAB), considerado a unidade hidrogeológica com maior área de exposição (96.000 km²) no estado e a mais vulnerável à contaminação humana (VARNIER *et al.* 2021).

As cidades do centro-oeste do estado de São Paulo, abastecidas total ou parcialmente pelo SAB, estão convivendo com o problema da contaminação por esse íon há vários anos, como atestam os trabalhos de CAGNON & HIRATA (2004), VARNIER *et al.* (2010, 2017), ROSENBERGER *et al.* (2013), MONTANHEIRO & CHANG (2016), MARQUES *et al.* (2019), HIRATA *et al.* (2020) e PILEGGI *et al.* (2021). Esses estudos apontaram a relação entre o nitrato nas águas subterrâneas e a urbanização, sendo que as maiores concentrações foram registradas nas zonas centrais das cidades, com ocupação mais antiga, maior densidade populacional e instalação da rede de esgoto, em geral anterior a 1990.

A contínua geração e persistência do nitrato em aquíferos sob centros urbanos vêm provocando a expansão das plumas desse contaminante, inclusive com o impacto de porções mais profundas do SAB, resultando na restrição de uso do recurso hídrico para o consumo humano, público e privado (MARQUES *et al.* 2019, HIRATA *et al.* 2020, BARRETO *et al.* 2022, TERADA 2022).

Dentre os casos reportados, cita-se o exemplo de Bauru. A cidade é 65% abastecida por água subterrânea e já foi objeto de diversos estudos hidrogeológicos desde o início da década de 1980 (PAULA E SILVA 1988, PAULA E SILVA & CAVAGUTI 1994, HIRATA 2000, GIAFFERIS & OLIVEIRA 2006, SILVA 2009, IG 2012, VARNIER *et al.* 2012, ROSENBERGER *et al.* 2013, DAEE 2015),

com a produção de uma vasta quantidade de dados e a construção do entendimento da distribuição do nitrato no SAB e no SAG. De acordo com DAE (2015), a pluma de nitrato no SAB estende-se por cerca de 15 km² e, em alguns locais, contém metais pesados, hidrocarbonetos de petróleo, solventes clorados e, potencialmente, contaminantes emergentes. Resultados obtidos por VARNIER *et al.* (2021) revelaram concentrações de nitrato superiores a 3,0 mg/L N-NO₃⁻ em poços de abastecimento público operados pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE) que exploram o SAG.

Compreender as causas e a extensão da contaminação de aquíferos urbanos por nitrato é fundamental para gerenciar a qualidade das águas subterrâneas, ainda mais para municípios paulistas que dependem fortemente desse recurso, como é o caso de Bauru.

Este estudo caracteriza o cenário da contaminação por nitrato na área urbana desse município, especificamente no SAB, entre 2019 e 2021, apresentando a distribuição deste contaminante no espaço e relacionando sua ocorrência aos possíveis fatores que o controlam em subsuperfície.

2 ÁREA DE ESTUDO

Grande parte da área urbana de Bauru está inserida na sub-bacia do rio Bauru, na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Tietê-Jacaré (UGRHI-13), e uma pequena parcela na do Tietê-Batalha (UGRHI-16), na sub-bacia do rio Batalha (Figura 1). A cidade possui 375.321 habitantes e a taxa de urbanização é de 98,3% (SNIS 2021, IBGE 2022).

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) mostram que 100% da população urbana tem acesso ao abastecimento público de água (SNIS 2021), operado pelo Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE). HIRATA *et al.* (2022) relatam que cerca de 35% do abastecimento público de água no município é proveniente da captação no rio Batalha (0,5 m³/s) e o restante é realizado por 40 poços tubulares, que extraem 1 m³/s de águas do SAG.

Além disso, há em Bauru cerca de 600 poços tubulares privados ativos, que extraem 580 m³/s do SAB e que atendem a 29% da demanda hídrica urbana total, sobretudo em condomínios, indústrias e

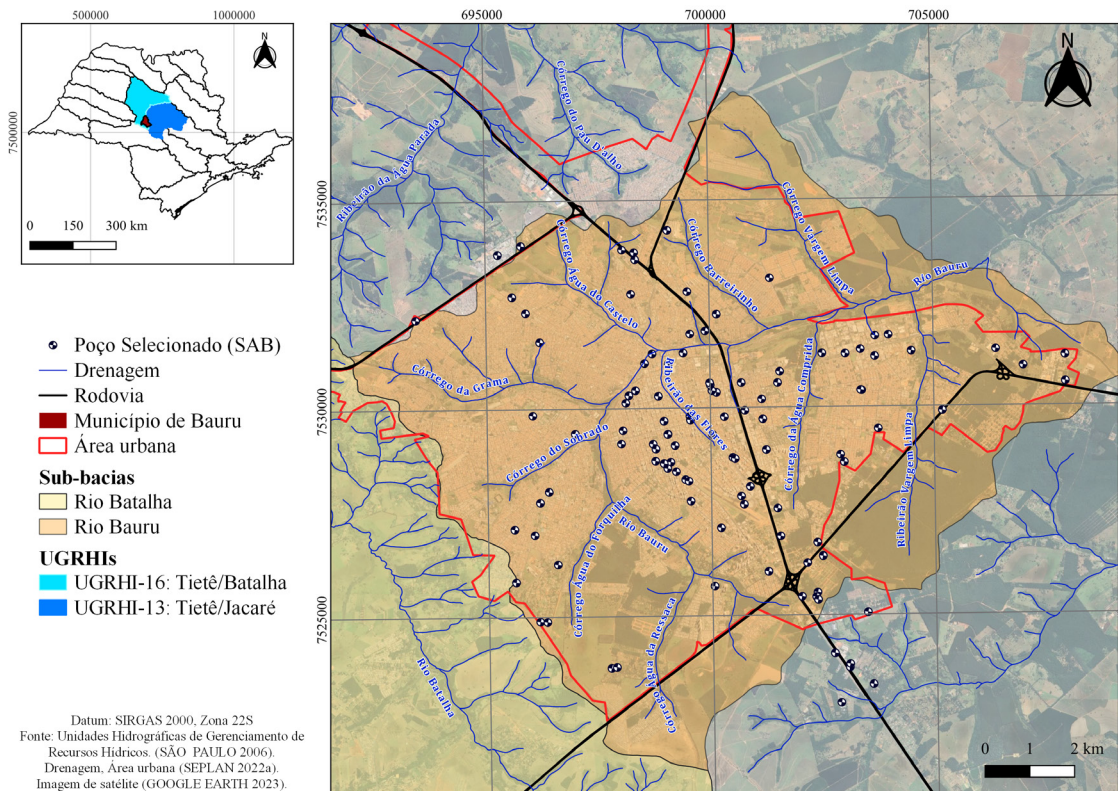


FIGURA 1 – Localização da área de estudo.

FIGURE 1 – Location of the study area.

comércio. Esses dados mostram que o fornecimento de água no município depende em grande parte das captações subterrâneas perfuradas nesses dois sistemas aquíferos.

Conforme o SNIS (2019), 98,8% da área de estudo é atendida pela rede coletora de esgotos, enquanto o tratamento é de apenas 1,7%. Isso significa que praticamente todo esgoto coletado é lançado *in natura* no rio Bauru e seus afluentes (córregos da Água Comprida, Água da Forquilha, Água da Ressaca, Água do Castelo, Água do Sobrado, da Grama e ribeirões das Flores e Vargem Limpa). Segundo o DAE (2021), são lançados aproximadamente 0,8 m³/s de efluente no rio Bauru, sendo 85% de origem doméstica e 15% industrial. Em locais onde a rede ainda não está presente, são utilizadas fossas sépticas e rudimentares (ROSENBERGER *et al.* 2013, DAEE 2015).

2.1 Hidrogeologia

Em Bauru, destacam-se quatro unidades hidroestratigráficas, do topo para a base: os sistemas aquíferos Bauru (SAB), Serra Geral (SASG) e Guarani (SAG), tendo como limite basal dessa sequência o Aquicludo Passa Dois (DAEE 2015).

O SAB é do tipo livre, com porosidade primária e se estende por toda a área de estudo. O con-

tato inferior é feito com o SASG ou com o SAG, de acordo com o posicionamento geográfico na cidade. A espessura média do SAB é de 83 m, podendo atingir até 202 m na porção sudeste da área urbana (ROSENBERGER *et al.* 2013).

Trabalhos locais mais recentes sobre esse sistema aquífero foram conduzidos por DAEE (2015) e SIMONATO *et al.* (2016). Segundo os autores, o SAB é representado no local, do topo para a base, pelo Aquitarde Marília, pelo Aquífero Adamantina e pelo Aquitarde Araçatuba, adotando-se a mesma divisão hidroestratigráfica proposta por PAULA E SILVA *et al.* (2005).

Os resultados obtidos pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE 2015) constituem o principal avanço no conhecimento da hidroestratigrafia no município, auxiliando no entendimento sobre a conexão hidráulica entre o SAB e o SAG na área da “janela de basalto”, assim denominada por SIMONATO *et al.* (2016), que se estende por grande parte da zona urbana de Bauru, nas porções sul e sudoeste.

A figura 2 mostra o modelo conceitual de circulação das águas subterrâneas no município de Bauru através de sua sequência hidroestratigráfica. Na área central, onde se encontra a cidade, há o hiato entre o SASG e o SAB, ou seja, as unidades do SAB estão depositadas diretamente sobre as do SAG.

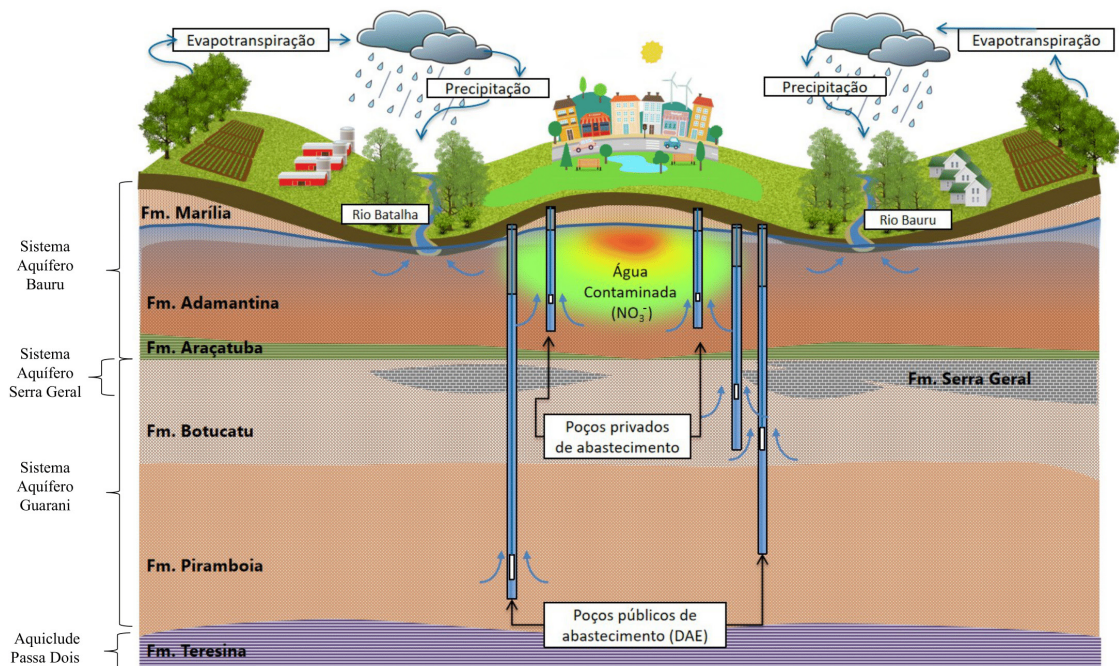


FIGURA 2 – Modelo de circulação das águas subterrâneas no município de Bauru.

FIGURE 2 – Conceptual model of groundwater flow in the municipality of Bauru.

A janela de basalto é consequência do tectonismo, onde as rochas que compõem o SASG foram expostas à erosão pré-Bauru, ocasionando exclusão total das mesmas em partes da cidade (PAULA E SILVA & CAVAGUTI 1994).

A recarga do SAB é proveniente das infiltrações das águas de chuva em toda a sua área aflorante, enquanto as áreas de descarga correspondem aos corpos hídricos superficiais, que na área urbana de Bauru, são os córregos da Grama, Água do Castelo e Água da Ressaca, todos afluentes do rio Bauru. A potenciometria é condicionada principalmente pela topografia.

O Aquitarde Marília apresenta uma distribuição restrita e aflora em porções de cotas mais altas, apresentando espessuras aproximadas de 30 m na região (DAEE 2015). Ele é composto por sedimentos arenosos grossos a conglomerados, angulosos e pouco selecionados e com forte cimentação carbonática. DAEE (2015) definiu essa unidade como aquitarde, pois ela se encontra não-saturada em água, não constituindo, portanto, um aquífero. Embora não seja relevante para a produção de água, o Aquitarde Marília exerce influência na recarga e na proteção da qualidade das águas do Aquífero Adamantina.

Por sua vez, o Aquífero Adamantina apresenta-se de forma mais ampla na cidade de Bauru, com espessuras entre 30 e 120 m, localmente sendo coberto pelo Aquitarde Marília, e aflorando em regiões de menor altitude, associadas às drenagens existentes na área (DAEE 2015). É caracterizado por areia fina a muito fina, com estratificação cruzada e alternância de camadas plano-paralelas de lamitos, siltitos ou arenito lamítico e habituais marcas onduladas e microestratificações cruzadas (SOARES *et al.* 1980). BRANDT NETO (1984) descreveu a presença de nódulos carbonáticos próximos ao topo da formação, em porções mais isoladas, assim como atribuiu composição carbonática ao cimento do arcabouço.

O Aquitarde Araçatuba é composto por camadas de lamito, com espessuras de 10 a 20 m, constituindo uma barreira de baixa permeabilidade que o isola hidráulicamente das unidades hidroestratigráficas inferiores, no caso o SASG ou o SAG. Essa unidade hidroestratigráfica imprime características de confinamento do SAG na área da janela de basalto, conforme apresentado em DAEE (2015) e SIMONATO *et al.* (2016).

2.2 Hidrogeoquímica

As águas do SAB são classificadas em dois grupos hidroquímicos: bicarbonatadas cálcicas a

mistas, conforme IG (2012), ou bicarbonatadas cálcio-magnesianas por DAEE (2015), e cloro-nitratadas, desde sódicas a mistas (IG 2012), ou cloretadas cálcio-magnesianas, com variações nitratadas (DAEE 2015).

De acordo com IG (2012), as águas do primeiro grupo possuem pH entre 5,3 e 7,4 (média = 5,92) e condutividade elétrica (CE) variando de 16,00 a 331,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (média = 78,91 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Dentre os principais íons, destacam-se cálcio, magnésio e bicarbonato. DAEE (2015) também obteve resultados semelhantes na área em questão, com valores de pH entre 5,0 e 7,0 e CE, em geral, <100 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

O segundo grupo é representado pelas águas cloro-nitratadas, desde sódicas a cálcicas, associadas aos poços com concentrações de nitrato superiores a 5 mg/L N-NO_3^- (IG 2012). Essas águas são ligeiramente ácidas, com pH entre 4,90 e 6,44 (média = 5,57) e CE de 34,00 a 265,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (média = 122,93 $\mu\text{S}/\text{cm}$). O cálcio e o magnésio são os cátions predominantes, e o cloreto e o nitrato os ânions maiores (IG 2012).

Concentrações de nitrato acima do padrão de potabilidade (até 15,1 mg/L N-NO_3^-) distribuem-se, notadamente, na zona central da área urbana de Bauru (IG 2012). Essa região foi a primeira a receber a rede de esgoto e apresenta o maior adensamento urbano, o que resulta na maior carga de nitrogênio ainda presente no SAB, além dos altos teores de cloreto na água, de até 58,3 mg/L. Tal constatação está de acordo com a caracterização da qualidade da água do SAB realizada por SILVA (2009), e corroborada por DAEE (2015) em poços no perímetro urbano, com valores de até 23,8 mg/L N-NO_3^- .

2.3 Expansão urbana

Fundada em 1896, a cidade de Bauru teve seu crescimento urbano ligado à produção cafeeira e às ferrovias, seguido de uma industrialização significativa e que impulsionou o setor terciário (CAPELOZZA 2016).

De modo similar a outras cidades brasileiras e paulistas, Bauru urbanizou-se de forma muito rápida. Na década de 1940, os dados do censo demográfico indicavam que a população urbana de Bauru já havia superado a rural, correspondendo a 50% da população da época, e, nos anos de 1950, a taxa de urbanização já era de 80% (DAMASCENO & GOULART 2021).

A figura 3 ilustra o mapa da evolução da mancha urbana entre 1910 e 2020, elaborado a partir da compilação dos dados apresentados por IG (2012) e SEPLAN (2022a).

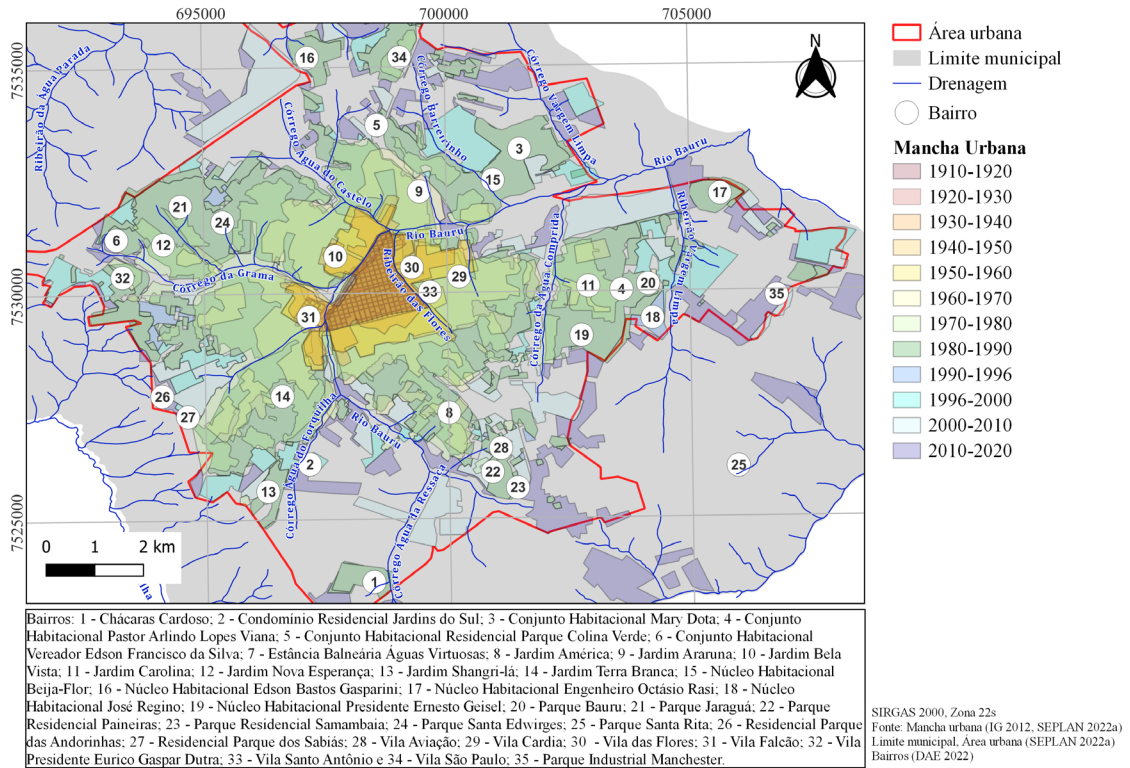


FIGURA 3 – Expansão da mancha urbana e localização de alguns bairros na cidade de Bauru (Fonte: IG 2012, SEPLAN 2022a).

FIGURE 3 – The expansion of the urban area and location of some neighborhoods in the city of Bauru (Source: IG 2012, SEPLAN 2022a).

Em 1918, a Vila Falcão tornou-se o primeiro bairro na área urbana da cidade. A partir daí outros surgiram em diversos pontos de Bauru, impulsionados pelas atividades industriais, como Vila Cardia, Vila Santo Antônio, Vila das Flores e Jardim América, a leste, Vila Souto, a oeste, e Vila Santa Tereza e Vila Santa Clara, ao sul (BAURU 1996).

Na década de 1950, a expansão urbana desenvolveu-se de forma descontrolada, culminando, inclusive, com a construção de viadutos que ligam os bairros Vila Falcão e Jardim Bela Vista ao centro da cidade.

Nessa época, diversos loteamentos foram implantados (p. ex. Parque Santa Edwírges, Parque Jaraguá, Vila Aviação, Jardim Carolina e Vila São Paulo), em parte oriundos de antigas fazendas do município que, com o declínio do café em todo o Estado, foram destinados ao uso urbano (Figura 3). Tais áreas, muitas vezes distantes da malha urbana ocupada, sem acesso e infraestrutura, permaneceram ociosas ou subutilizadas por vários anos (BAURU 1996).

De 1970 a 1980, houve aumento demográfico significativo em Bauru, resultando na formação de núcleos de moradias em áreas periféricas. Ainda nessa época, apareceram as primeiras comunidades em fundos de vales e às margens de córregos, além de residências populares, próximas às estações ferroviárias e em locais mais acidentados (SOARES 1996).

Dentre os loteamentos na década de 1970, citam-se as chácaras de recreio (p. ex. Estância Balneária Águas Virtuosas, Chácara Cardoso, Jardim Terra Branca e Parque Santa Rita), todas localizadas no setor sudeste/sudoeste (BAURU 1996).

ROSSI (2016) relata que nesse período houve a implantação de empreendimentos que vieram a se caracterizar como loteamentos fechados, na zona sul de Bauru, como o Parque Residencial Paineiras, Jardim Shangri-lá e Parque Residencial Samambaia (Figura 3).

Nas décadas seguintes, 1980 e 1990, predominaram as construções de condomínios verticais de classe média, localizados principalmente no

centro da área urbana, caracterizado pela maior concentração de comércios e serviços da cidade. A tendência também se estendeu à classe alta, dessa vez ao sul do município.

Conforme LOPES JR. (2007), a porção leste da área urbana de Bauru recebeu novos conjuntos habitacionais, mas com crescimento limitado pelas áreas verdes adjacentes. Foram criados núcleos e conjuntos habitacionais, tais como Beija-Flor, Residencial Parque Colina Verde, Jardim Araruna, Engenheiro Octávio Rasi, Edson Bastos Gasparini, Presidente Ernesto Geisel e Mary Dota (Figura 3).

A oeste do centro, surgiram os núcleos e conjuntos habitacionais Jardim Nova Esperança, Presidente Eurico Gaspar Dutra e Vereador Edson Francisco da Silva (BAURU 1996). No entanto, o crescimento desses locais foi impedido pelas Áreas de Proteção Ambiental (APAs), como apontado por MAIA (2019).

Na última década do século XX, surgiram a leste, próximos ao Parque Bauru, o Conjunto Habitacional Pastor Arlindo Lopes Viana e o Núcleo Habitacional José Regino. MAIA (2019) relata que um novo tipo de moradia para a população de alta renda foi implantado na cidade, os condomínios horizontais fechados de alto padrão, que se localizam, principalmente, no setor sul da cidade (Residencial Parque dos Sabiás, Residencial Parque das Andorinhas e Residencial Jardins do Sul).

ROSSI & CONSTANTINO (2015) afirmam que as áreas periféricas destinavam-se ao uso rural e foram rapidamente urbanizadas, com o auge nos anos 2000.

No período de 2011 a 2020, a dinâmica da expansão urbana consistiu em novamente ultrapassar antigas barreiras impostas à extensão da urbanização (DAMASCENO 2021). A partir de 2018, um novo perímetro urbano foi aprovado, possibilitando a expansão do tecido urbano, para além das rodovias Comandante João Ribeiro de Barros (SP-294) e Engenheiro João Batista Cabral (SP-369). Segundo DAMASCENO (2021), até 2020, esse transbordamento legal implicou no crescimento mais acentuado sobretudo na região sul como uma demanda dos segmentos de mais alta renda e por esta ser uma das poucas localidades com áreas vazias passíveis de serem urbanizadas. Destacam-se também as regiões leste e norte de Bauru, com a ocupação de alguns vazios que restaram ao longo dos anos anteriores, com a abertura de loteamentos e implantação de conjuntos habitacionais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Cadastro de poços tubulares

O cadastro de poços tubulares, privados e de abastecimento público envolveu a obtenção e integração de dados provenientes de: i) bases do IG (2012) e DAEE (2015); ii) processos do Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE) para captações entre 2015 e 2022; iii) base do Sistema de Informação de Águas Subterrâneas (SIDAS), concedido pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) para outorgas até 2017; iv) base do Sistema de Outorga Eletrônica (SOE) do DAEE para outorgas entre 2017 e 2021.

Todos esses dados foram tabulados e sistematizados em uma planilha matriz a fim de compor um banco digital unificado. Foram registrados 634 poços: 469 com captação do Sistema Aquífero Bauru (SAB), 79 do Sistema Aquífero Guarani (SAG), 18 do Sistema Aquífero Serra Geral (SASG), um com captação mista SAB/SAG, um com captação mista SAB/SASG e 66 sem informações. Diante desse levantamento, efetuou-se uma análise de consistência para interpretação e reavaliação dos parâmetros disponíveis, priorizando os poços que apresentassem: i) dados do proprietário; ii) localização na área urbana; iii) dados construtivos, geológicos e hidrogeológicos; v) análises préteritas e recentes de nitrato. Dessa análise, considerando apenas os poços que captam água do SAB, foco deste estudo, obteve-se um total de 108 poços tubulares, cuja distribuição pode ser visualizada na figura 1.

3.2 Levantamento do uso e ocupação do solo e evolução do esgotamento sanitário

Os dados sobre uso e ocupação do solo e zoneamento urbano para a cidade de Bauru foram obtidos mediante o mapa concedido pela Secretaria de Planejamento da Prefeitura Municipal de Bauru (SEPLAN 2022b), contendo a descrição e delimitação dos setores territoriais.

Ademais, considerou-se também a densidade de ocupação urbana, segundo metodologia proposta por SÃO PAULO (2014). Esse atributo representa a relação entre o número ou tamanho dos lotes por unidade de área, o que permite diferenciar os locais de ocupação mais densa daqueles de ocupação mais esparsa. A tabela 1 apresenta o atributo de densidade de ocupação urbana dividida em cinco classes, desde muito alta até muito baixa.

TABELA 1 – Descrição das classes do atributo densidade de ocupação urbana (Fonte: SÃO PAULO 2014).

TABLE 1 – Description of the classes of the urban occupancy density attribute (Source: SÃO PAULO 2014)

<i>Classe</i>	<i>Descrição</i>
Muito alta densidade	Áreas com predominância de edificações verticalizadas e ocupações em lotes de até 150 m ²
Alta densidade	Áreas com predomínio de lotes de até 250 m ²
Média densidade	Áreas com predomínio de lotes de 250 a 450 m ²
Baixa densidade	Áreas com predomínio de lotes maiores que 450 m ²
Muito baixa densidade	Ocupações com chácaras e sítios

As informações sobre a situação da infraestrutura sanitária em Bauru (rede de esgoto) e sua evolução ao longo do tempo, referente a levantamentos efetuados em 1976, 1996 e 2022, foram obtidas junto ao DAE.

Ainda nesse levantamento, foram analisados outros indicadores de saneamento entre os anos de 1976 e 2022, incluindo: i) população atendida por esgoto; ii) extensão da rede de esgoto; iii) número de ligações totais e ativas de esgoto; e iv) índices e volumes de esgoto coletado e tratado.

Esses dados foram extraídos do Plano Diretor de Saneamento (BAURU 2016), do Plano Diretor Municipal (BAURU 1996), do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS 2021) e do Departamento de Água e Esgoto de Bauru (DAE 2021).

3.3 Avaliação das concentrações de nitrato e cloreto medidas em poços tubulares

As concentrações de nitrato e cloreto em águas subterrâneas foram obtidas a partir de 151 laudos de 76 poços tubulares selecionados que extraem água do SAB, provenientes dos autos do DAE para os anos de 2019 e 2021.

Para o nitrato, as concentrações foram divididas em classes conforme os seguintes intervalos e premissas:

- Valores de $0 \leq C < 3$ mg/L N-NO₃⁻: águas sem alteração antrópica;
- Valores de $3 \leq C < 5$ mg/L N-NO₃⁻: águas com alguma influência antrópica;

- Valores de $5 \leq C \leq 10$ mg/L N-NO₃⁻: águas com concentração de nitrato correspondente ao Valor de Alerta (VA);
- Valores de $C > 10$ mg/L N-NO₃⁻: águas com concentrações de nitrato superiores ao padrão de potabilidade, conforme Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL 2021).

Adicionalmente, avaliou-se a evolução temporal de nitrato nas águas subterrâneas, procurando-se por tendências de aumento ou diminuição das concentrações deste contaminante no SAB, para o período de 1999 a 2021. Esses resultados foram comparados com aqueles obtidos por SILVA (2009), IG (2012), CANATO *et al.* (2014) e DAE (2015). Nesta análise, foram consideradas 278 resultados analíticos, provenientes de 84 captações distribuídas na cidade de Bauru.

Os dados químicos foram digitados e organizados em *shapefiles* com o auxílio do programa QGIS, da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), versão 3.16.10.

3.4 Tratamento dos dados

As análises estatísticas descritiva e bivariada foram adotadas para o tratamento e interpretação das informações adquiridas, com o propósito de investigar a ocorrência do nitrato no Sistema Aquífero Bauru (SAB), relacionando-o aos principais fatores que controlam esse contaminante em subsuperfície: profundidade do poço, idade da rede de esgoto, densidade de ocupação urbana e idade da mancha urbana.

As médias aritméticas (\bar{X}) e as medianas (Md) das concentrações de nitrato foram calculadas para avaliar o comportamento dessas concentrações no tempo em poços cadastrados na área urbana de Bauru, para o período de 1999 a 2021. Inicialmente, esses valores foram divididos em cinco grupos com base na data de coleta das amostras (1999-2003, 2004-2008, 2009-2013, 2014-2018 e 2019-2022) e, para cada grupo, foram calculados Md , 1º e 3º quartis (25% e 75%, respectivamente), além dos valores mínimo e máximo das concentrações.

Ademais, realizou-se uma análise estatística dos resultados das análises químicas frente às idades de urbanização e de saneamento, mediante o coeficiente de correlação de Spearman (ρ) e o coeficiente gama de Goodman e Kruskal (γ).

O teste de Spearman corresponde a uma análise estatística não paramétrica usada para detectar tendências monotônicas em uma série temporal (LEHMANN 1975, DANIEL 1978, SNEYERS

1990). Segundo SIEGEL (1975), o coeficiente de correlação de Spearman é uma medida que exige que as duas variáveis em análise se apresentem em escala de mensuração pelo menos ordinal, de forma que os elementos em estudo formem duas séries ordenadas. Esse tipo de análise foi adotado para avaliar o grau de correlação entre as concentrações de nitrato e cloreto nas águas subterrâneas.

O coeficiente de correlação de Spearman (ρ) é calculado pela equação 1 a seguir:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n R_i^2}{n(n^2-1)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde, R_i = diferença entre os dois postos de cada i -ésimo par observado; n = número de pares dos valores. Os valores de ρ variam entre -1 (correlação negativa) e 1 (correlação positiva).

Por sua vez, o coeficiente gama de Goodman e Kruskal (γ) é determinado com o intuito de avaliar o grau de dependência entre duas variáveis qualitativas (ou categóricas) e ordenáveis, baseado no número de pares de observações concordantes e discordantes (ADEYEMI 2011), como mostra a equação 2:

$$\gamma = \frac{N_c - N_d}{N_c + N_d}, -1 \leq \gamma \leq 1 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde, N_c = número total de pares concordantes; N_d = número total de pares discordantes.

Quanto mais próximo de 1 ou -1, mais forte será o grau de associação, sendo considerado fraco ou nulo quanto mais perto de 0.

Os pares considerados na análise desse estudo foram: i) concentração de nitrato x densidade de ocupação urbana; ii) concentração de nitrato x idade da mancha urbana; iii) concentração de nitrato x idade da rede de esgoto; e iv) concentração de nitrato x profundidade do poço. Com o intuito de criar associações, as variáveis foram ordenadas em categorias (Tabela 2).

De posse dos coeficientes gama de Goodman e Kruskal (γ) calculados, aplicou-se o teste gama de significância (z), considerando um nível de significância de 5%. Os valores de z foram obtidos segundo a equação 3:

$$z = \gamma \sqrt{\frac{N_c + N_d}{N(1-\gamma^2)}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde, γ = coeficiente gama de Goodman e Kruskal; N_c = número total de pares concordantes; N_d = número total de pares discordantes; N = número de amostras.

TABELA 2 – Relação das variáveis e respectivas categorias adotadas para o cálculo do coeficiente gama de Goodman e Kruskal (γ).

TABLE 2 – List of variables and their respective categories adopted to calculate the Goodman and Kruskal gamma coefficients (γ).

Variável	Categoria
	$0 \leq C < 3$
1. Concentração de nitrato (mg/L N-NO ₃ ⁻)	$3 \leq C < 5$ $5 \leq C \leq 10$ $C > 10$
2. Idade da rede de esgoto (ano)	1976 1996 2022
3. Idade da mancha urbana (ano)*	1910-1960 1960-1990 1990-2022
4. Densidade de ocupação urbana**	muito baixa baixa média alta muito alta
5. Profundidade do poço (m)	$0 < P \leq 50$ $50 < P \leq 100$ $100 < P \leq 150$ $P > 150$

* - Categorias atribuídas com base na tendência de distribuição das concentrações de nitrato.

** - Categorias atribuídas segundo classificação proposta por SÃO PAULO (2014).

A partir do z calculado, consultou-se a tabela de distribuição Z - Padrão (BENDAT & PIERSOL 2010), a qual depende do nível de significância (α) que se deseja aplicar ao teste. No presente trabalho foi adotado o nível de significância de 5%, que corresponde a um valor de Z crítico igual a 1,96. Com os valores calculados de γ e de z , realizou-se, para cada par de variáveis, um teste estatístico de hipótese. Nesse caso, a chamada “hipótese nula” corresponde àquela em que não existe correlação entre as variáveis e é rejeitada quando $z > Z$ crítico. Alternativamente, quando $z \leq Z$ crítico, a “hipótese nula” não pode ser rejeitada, ou seja, não há razão para se considerar relevante a correlação entre as variáveis testadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Uso e ocupação do solo urbano

A figura 4a representa o mapa de uso e ocupação do solo simplificado da área urbana de Bauru,

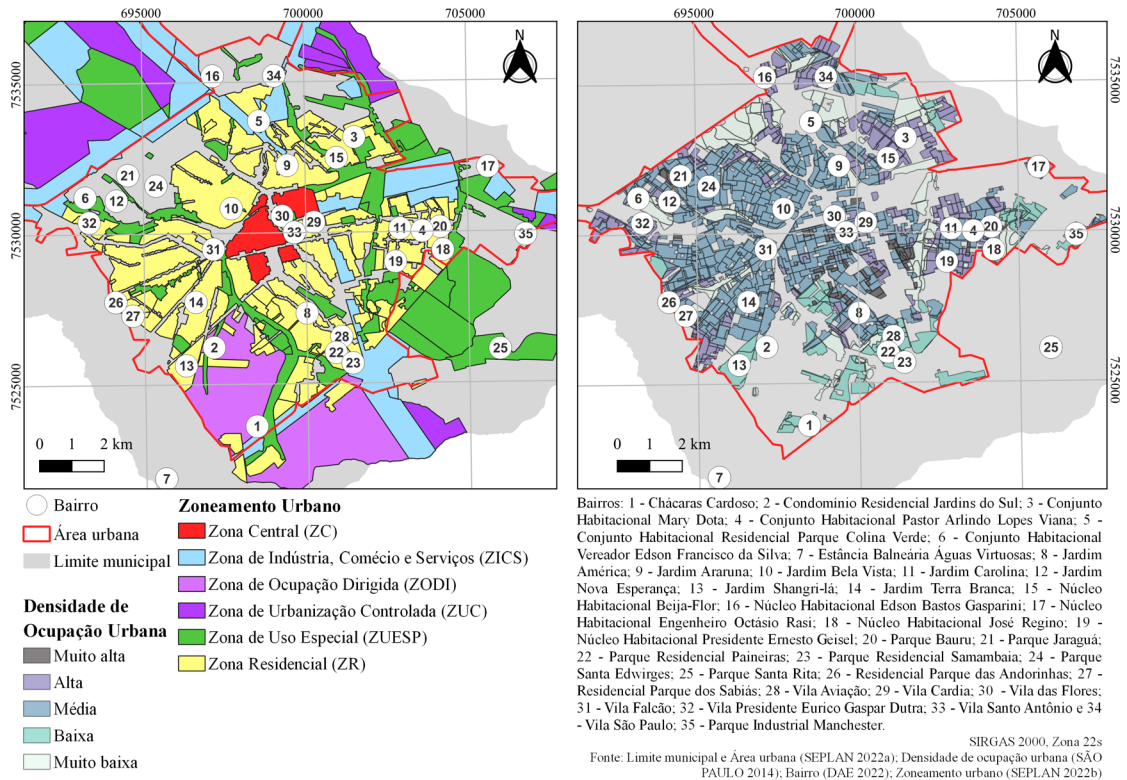


FIGURA 4 – Mapas da área urbana da cidade de Bauru: (a) Uso e ocupação do solo (Fonte: adaptado de SEPLAN 2022b) e (b) Densidade de ocupação urbana (Fonte: adaptado de SÃO PAULO 2014).

FIGURE 4 – Maps of the urban area of the city of Bauru: (a) Land use and occupation (Source: adapted from SEPLAN 2022b), and (b) Urban occupancy density (Source: adapted from SÃO PAULO 2014).

com base na subdivisão do território definido na Lei Municipal 7.116/2018 (BAURU 2018). Nele, foram delimitadas as seguintes zonas: i) central (ZC), ii) indústria, comércio e serviços (ZCIS), iii) ocupação dirigida (ZODI), iv) residencial (ZR), v) urbanização controlada (ZUC) e vi) uso especial (ZUESP).

A zona central (ZC) representa o núcleo urbano original e destina-se ao comércio e serviço, sendo referência do comércio popular na cidade de Bauru e ocupa aproximadamente 2,4% da área urbana.

A zona de indústria, comércio e serviços (ZICS) abrange áreas reservadas exclusivamente para atividades industriais, comerciais e de serviços incompatíveis ao uso residencial. Distribui-se nos limites norte, leste e sul da área urbana (Figura 4a), abrangendo 28% da área urbana.

Em Bauru, observa-se um maior percentual de locais destinados à zona residencial (ZR) e que representam 30% da área urbana.

A sudoeste da cidade, destaca-se a zona de ocupação dirigida (Figura 4a). De acordo com SE-

PLAN (2022b), a ZODI caracteriza-se pela presença de muitos condomínios horizontais e com controle de acesso, em meio a grandes vazios urbanos, representando 9,8% da área urbana.

Também merece destaque a zona de urbanização controlada (ZUC) e que corresponde a porções do território não urbanizadas ou com urbanização incipiente, junto às divisas intermunicipais (Figura 4a). Conforme BAURU (2022), a ZUC representa 10,7% da área urbana e tem por objetivo orientar o parcelamento e a ocupação do solo, mantendo baixa densidade populacional, e criando espaços de transição entre o tecido urbano em consolidação e a zona rural.

Por fim, a zona de uso especial (ZUESP) ocupa 19,1% da área urbana e é reservada a terrenos de grande porte, como cemitérios e centro de detenção, indústrias antigas incorporadas à área urbana ao longo dos anos, entre outros. Considera, ainda, o atual aterro sanitário do município, em processo de encerramento, e a área destinada à implantação industrial de um novo sistema de disposição e tratamento de resíduos sólidos (BAURU 2022).

Em termos de densidade de ocupação urbana, predominam em Bauru espaços cuja classe foi atribuída como “média”, distribuídos, em sua maior parte, no centro da mancha urbana, mais antiga, e que se estendem em direção aos setores norte, oeste e sul (Figura 4b). São exemplos dessas áreas bairros como Vila Cardia, Vila das Flores, Vila Santo Antônio, Vila Falcão, conjuntos habitacionais Pastor Arlindo Lopes Viana e Vereador Edson Francisco da Silva, dentre outros. Esses locais estão incluídos, basicamente, nas zonas central (ZC) e residencial (ZR).

As densidades de ocupação urbana classificadas como “alta” e “muito alta” estão distribuídas em pequenas áreas nas zonas periféricas, sobretudo a nordeste da cidade e, em menor escala, a oeste e ao norte (Figura 4b). Correspondem a loteamentos que, em sua maioria, foram ocupados após a década de 1980. Nessas zonas periféricas, concentram-se os bairros populares, os conjuntos habitacionais e as comunidades, e que incluem, por exemplo, os núcleos habitacionais Edson Bastos Gasparini, José Regino e Presidente Ernesto Geisel e os conjuntos habitacionais Mary Dota, Vila Presidente Eurico Gaspar Dutra e Vereador Edson Francisco da Silva.

As áreas com densidades de ocupação urbana “baixa” e “muito baixa” surgem predominantemente na porção sudoeste da mancha urbana, sendo observadas também a norte e a nordeste da mesma (Figura 4b). A ocupação desses locais começou nos anos 2000 e, em geral, inclui as zonas de uso residencial, industrial, comércio e serviços (ZICS), urbanização controlada (ZUC) e de uso especial (ZUESP). Fazem parte dessas áreas bairros como o Parque Industrial Manchester, Condomínio Residencial Jardins do Sul, entre outros (Figura 4b).

4.2 Evolução da rede de esgoto

Bauru, como muitas cidades paulistas no início do seu crescimento, utilizavam fossas sépticas e rudimentares para o lançamento dos efluentes domésticos.

A rede de esgoto foi implantada nos anos de 1940 e atendia, principalmente, à porção central da área urbana (BAURU 1996).

Entre 1950 e 1960, a rede expandiu-se de maneira fragmentada e sem muito planejamento, seguindo apenas a topografia, abrangendo as áreas mais populosas. A partir de 1969, o sistema de esgotamento sanitário foi ampliado, dessa vez mediante critérios técnicos, embora ainda não houvesse um projeto geral que atendesse à população presente e futura (BAURU 1996).

Dados do Plano Diretor de Bauru (BAURU 1996) apontaram que no ano seguinte cerca de 75% das residências tinha acesso à rede de esgoto e que, em 1996, esse percentual havia aumentado para 98%, totalizando 75.091 ligações e 1.323,32 km de tubulação.

Segundo SNIS (2021), em 2016, a extensão total da rede equivalia a 1.536,18 km, dos quais 88% eram compostos por tubos de diâmetro igual a 150 mm, na sua maioria de PVC, com ponta e bolsa, e junta elástica com anel de borracha. Parte da rede coletora (~10 a 20%), notadamente a mais antiga, era constituída por manilha cerâmica, conforme apontado por BAURU (2016).

Posteriormente, novas redes coletoras de esgoto foram construídas e, somadas às que já existem, e correspondem, atualmente, a 1.593,73 km (DAE *comunicação verbal*). Esse montante é responsável pela coleta de 98,3% de todo o efluente produzido na cidade.

O sistema de esgotamento sanitário que cobre a maior parte da área urbana de Bauru é composto por ligações prediais, rede coletora, interceptores, emissários e estações elevatórias. As redes coletoras são conectadas em sub-bacias de drenagem com coletores que fluem o esgoto aos interceptores localizados nos fundos dos vales (BAURU 2016).

A figura 5 ilustra a evolução do esgotamento sanitário nos anos de 1976, 1996 e 2022. De acordo com BAURU (2017), alguns bairros são desprovidos total ou parcialmente de rede de esgoto, como: Chácaras Bauruense, Chácaras Cardoso, Estância Balneária Águas Virtuosas, Jardim Imperial, Jardim Marabá, Jardim Mary, Parque Panorama, Parque Santa Rita, Vale do Igapó, entre outros. Nesses locais, ainda são usadas fossas sépticas e rudimentares para receber todo efluente gerado pela população.

Até 2010, a cidade de Bauru era totalmente desprovida de tratamento de esgoto. Em 2011, foi inaugurada a primeira Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), denominada Candeia - Dr. Arlindo Marques Figueiredo.

Instalada em uma área de 6,7 km², às margens dos córregos Pau d’Alho e Monte Belo, afluentes do Ribeirão da Água Parada, essa ETE situa-se na área urbana (Figura 5) e atende a uma população de cerca de 30.000 habitantes, distribuídos nos bairros Núcleo Habitacional Edson Bastos Gasparini, Núcleo Habitacional Índia Vanuíre, Parque Residencial Pousada da Esperança, Jardim Helena, Vila São Paulo, Residencial Nova Bauru e Parque Vitória Régia, conforme BAURU (2016) e DAE (2021).

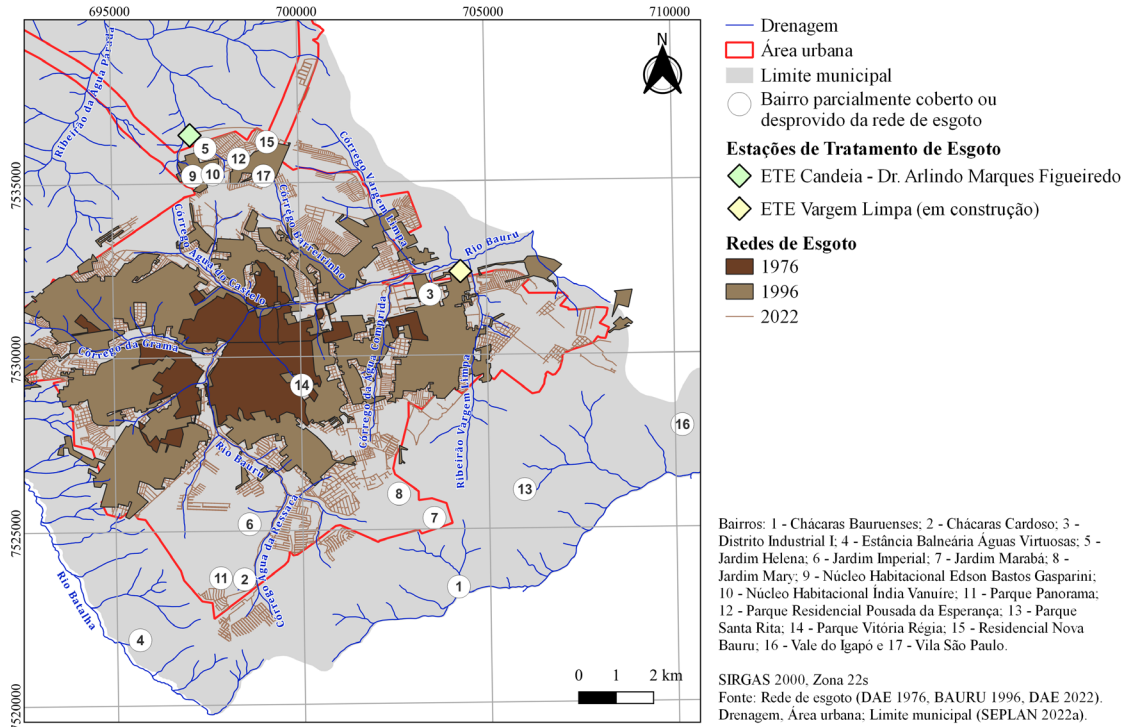


FIGURA 5 – Evolução da rede de esgoto na área urbana de Bauru (DAE 1976, BAURU 1996, DAE 2022).

FIGURE 5 – Evolution of the sewer network in the city of Bauru (DAE 1976, BAURU 1996, DAE 2022).

De acordo com os dados apresentados por DAE (2021), apenas 5% do esgoto da cidade de Bauru é tratado nas ETEs Candeia e Tibiriçá, a última situada no distrito homônimo. O restante, 95%, é lançado *in natura* no Rio Bauru e seus 10 afluentes, que são: Córrego Água da Ressaca, Córrego Água do Forquilha, Córrego do Sobrado, Córrego da Grama, Córrego Água do Castelo, Ribeirão das Flores, Córrego Barreirinho, Córrego da Água Comprida, Córrego Vargem Limpa e Ribeirão Vargem Limpa (Figura 5).

Atualmente, está em fase final de construção a ETE Vargem Limpa, localizada atrás do Distrito Industrial I. A estação foi projetada para tratar 1,42 m³/s de esgoto e atender a uma população de cerca de 500.000 habitantes.

4.3 Distribuição espacial das concentrações recentes de nitrato

A figura 6 mostra a distribuição espacial das concentrações médias de nitrato mais recentes, calculadas a partir dos resultados de 151 análises químicas registradas em 76 poços nos anos de 2019 e 2021.

Considerando as duas campanhas de análises químicas, 10,3% das amostras apresentaram con-

centrações médias de nitrato (C) acima do padrão de potabilidade. Os valores máximos corresponderam a 23,0 mg/L N-NO₃⁻ para 2019 e 15,8 mg/L N-NO₃⁻ para 2021.

Valores médios no intervalo do Valor de Alerta (VA) foram observados em 22,6% das amostras, com máximos de 9,6 mg/L N-NO₃⁻ em 2019 e 9,8 mg/L N-NO₃⁻ em 2021. Em 67% das amostras analisadas, foram obtidas concentrações inferiores a 5 mg/L N-NO₃⁻, sendo 52% na classe $0 \leq C < 3$ mg/L N-NO₃⁻ e 15% na classe $3 \leq C < 5$ mg/L N-NO₃⁻.

Concentrações médias de nitrato (C) maiores que 10 mg/L N-NO₃⁻ foram verificadas em poços distribuídos, em sua maioria, no centro da cidade. Por outro lado, as captações com resultados de nitrato no intervalo $5 \leq C \leq 10$ mg/L N-NO₃⁻ ocorrem, em geral, da região central para as mais distantes (Figura 6).

Os teores mais baixos desse contaminante ($0 \leq C < 3$ e $3 \leq C < 5$ mg/L N-NO₃⁻) situam-se nas porções mais periféricas (sudeste e leste), em direção ao limite do perímetro urbano. Contudo, há poços nessas faixas de valores também na região central da cidade, o que corrobora os estudos conduzidos no local por IG (2012).

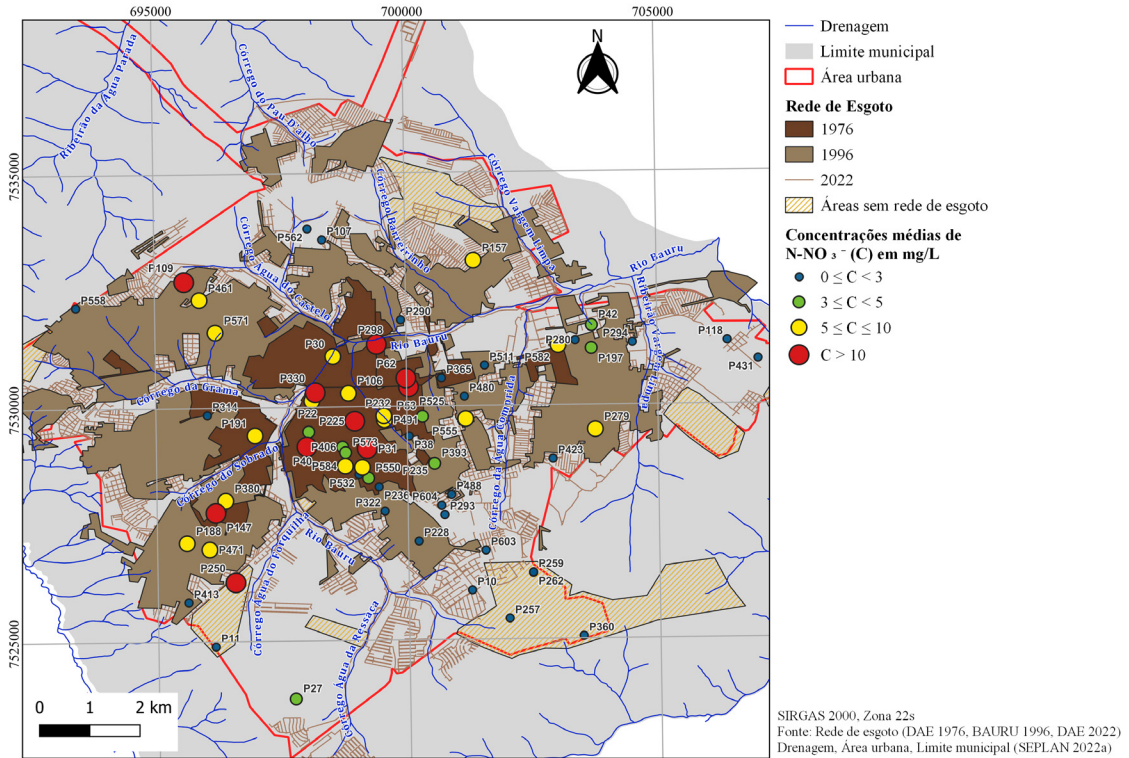


FIGURA 6 – Distribuição espacial das concentrações médias de nitrato na área urbana de Bauru, calculadas a partir das análises químicas de 2019 e 2021 (n = 151 amostras).

FIGURE 6 – Spatial distribution of average nitrate concentrations in the urban area of Bauru, calculated from chemical analyses registered in 2019 and 2021 (n = 151 samples)

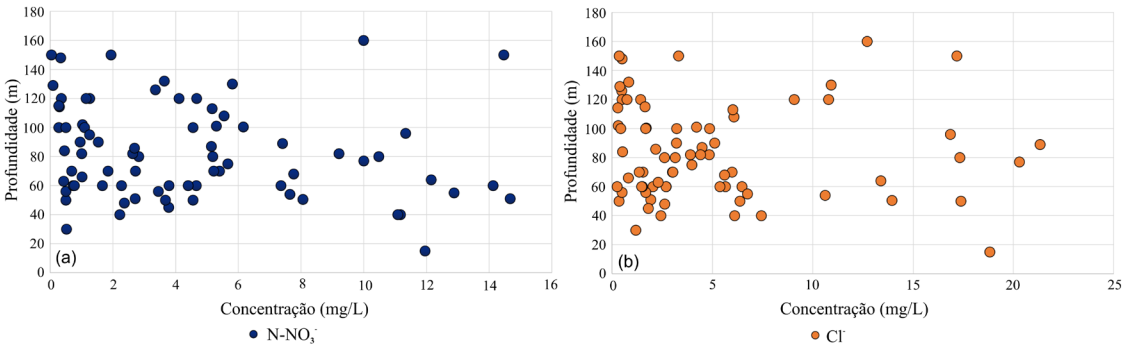


FIGURA 7 – (a) Valores de concentrações médias de nitrato em relação à profundidade dos poços tubulares, calculadas a partir das análises de 2019 e 2021 (n = 151 amostras) e (b) Valores de concentrações médias de cloreto em relação à profundidade dos poços tubulares, calculadas a partir das análises de 2019 e 2021 (n = 151 amostras).

FIGURE 7 – (a) Average nitrate concentration values in relation to the depth of the drilling wells, calculated from the 2019 and 2021 analyses (n = 151 samples). (b) Average chloride concentration values in relation to the depth of the drilling wells, calculated from the 2019 and 2021 analyses (n = 151 samples).

A relação entre as concentrações médias de nitrato com a profundidade dos poços não foi identificada (Figura 7a), sendo registradas altas concentrações tanto em poços rasos (N-NO₃⁻ = 11,95 mg/L; prof. = 15 m) como profundos (N-NO₃⁻ = 14,46

mg/L; prof. = 150 m). O mesmo acontece com as concentrações de cloreto (Figura 7b): altos valores foram verificados em poços rasos (Cl⁻ = 18,83 mg/L, prof. = 15 m; Cl⁻ = 17,38 mg/L; prof. = 50 m) e profundos (Cl⁻ = 17,18 mg/L, prof. = 150 m; Cl⁻ = 12,71

mg/L, prof. = 160 m). A distribuição desses parâmetros em subsuperfície poderia ser explicada por: i) ingresso de efluentes nas porções mais rasas captados pelas seções filtrantes dos poços menos profundos (< 100 m); ii) misturas de águas de diferentes níveis do SAB (rasos, intermediário e profundo) e que seriam extraídas de poços mais profundos.

O panorama de distribuição das concentrações desses íons nas águas do SAB em Bauru e em diferentes locais no estado de São Paulo também foi observado por VARNIER *et al.* (2010), MONTANHEIRO & CHANG (2016) e STRADIOTO *et al.* (2019).

A análise estatística entre os valores médios de cloreto e de nitrato indica correlação positiva significativa, cujo valor do coeficiente de correlação de Spearman é igual a 0,71 e nível de significância igual a 5% ($\alpha = 0,05$). Esse comportamento pode ser explicado pelo aporte de efluente ao aquífero, responsável pelo aumento expressivo nas concentrações desses indicadores nas águas subterrâneas.

4.4 Relação entre as concentrações de nitrato, urbanização e esgotamento sanitário

Os resultados analíticos de nitrato foram confrontados com as informações sobre a urbanização (expansão da mancha urbana e densidade de ocupação urbana) e o esgotamento sanitário (rede de esgoto).

As figuras 8 e 9 mostram a distribuição das médias das concentrações de nitrato sobre os mapas de expansão e densidade de ocupação urbana, respectivamente. Os poços que possuem valores de nitrato acima do padrão de potabilidade ($C > 10$ mg/L N-NO₃⁻) ou dentro do Valor de Alerta (VA: $5 \leq C \leq 10$ mg/L N-NO₃⁻) estão distribuídos, em geral, nas áreas mais antigas da cidade (Figura 8). Esses locais são abrangidos pelas malhas urbanas de 1910 a 1960, e que têm, majoritariamente, densidade de ocupação média (Figura 9).

Nas manchas urbanas de 1960 a 1980, há poços com resultados de nitrato que se enquadram no intervalo estabelecido para o Valor de Alerta (Fi-

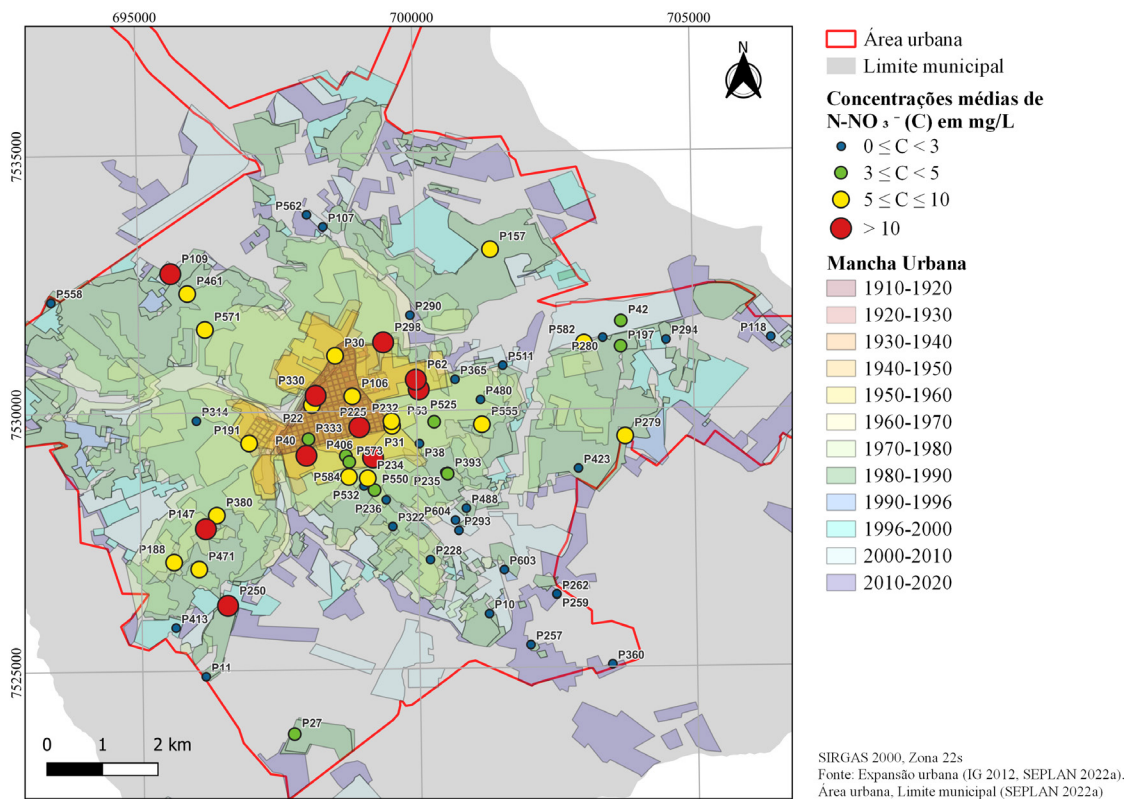


FIGURA 8 – Distribuição espacial das concentrações médias de nitrato (2019 e 2021) frente à expansão da mancha urbana (n = 151 amostras).

FIGURE 8 – Spatial distribution of the average nitrate concentrations (2019 and 2021) in relation to the urban area expansion (n = 151 samples).

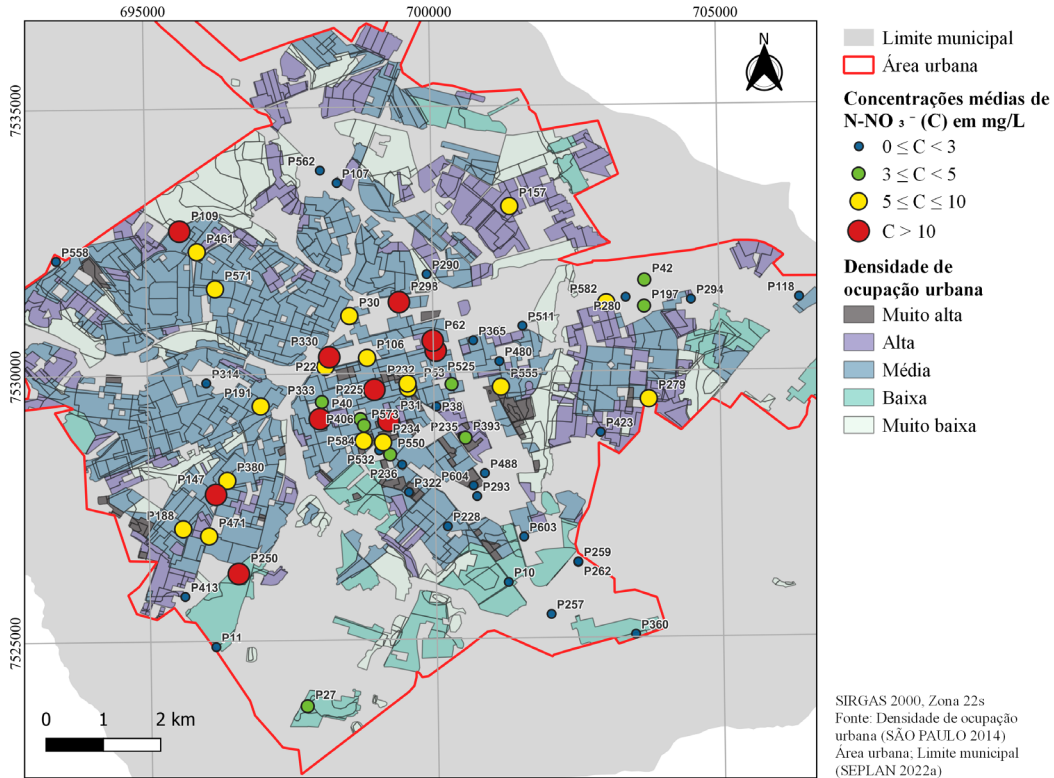


FIGURA 9 – Distribuição espacial das concentrações médias de nitrato (2019 e 2021) frente à densidade de ocupação urbana (n = 151 amostras).

FIGURE 9 – Spatial distribution of the average nitrate concentrations (2019 and 2021) in relation to the urban occupancy density (n = 151 samples).

gura 8). Nesses locais, a densidade de ocupação urbana é bastante variável, desde média a muito alta (Figura 9).

Já nos espaços demarcados pelas malhas urbanas de 1980 a 2020, a maioria dos poços possui concentrações no intervalo de $0 \leq C < 3$ mg/L N-NO_3^- e de $3 \leq C < 5$ mg/L N-NO_3^- . No entanto, destacam-se captações cujas concentrações estão dentro do Valor de Alerta (VA) ou acima do padrão de potabilidade.

Os resultados de nitrato também foram relacionados à idade do esgotamento sanitário (Figura 6). Inúmeros poços com valores de nitrato acima do padrão de potabilidade ou no intervalo de VA estão em áreas com cobertura da rede de esgoto de 1976, portanto, mais antiga.

É importante destacar que até meados da década de 1970 os loteamentos que surgiram no município precederam à instalação da rede de esgoto. A partir da criação do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) e, anos depois, da publicação da Lei Federal nº 6.766/1979 (BRASIL 1979), toda a infraestrutura básica dos parcelamentos deveria

ser composta por equipamentos urbanos de escoamento das águas pluviais, iluminação pública, esgotamento sanitário e abastecimento de água potável.

Os poços com concentrações de nitrato mais baixas, situadas nas classes $0 \leq C < 3$ e $3 \leq C < 5$ mg/L N-NO_3^- , distribuem-se, sobretudo, em locais cuja rede de esgoto é mais nova (1996 e 2022), cuja instalação ocorreu simultaneamente à criação dos loteamentos (Figura 6).

Contudo, captações com valores desse contaminante em um dos dois intervalos supracitados são também notados nos bairros mais antigos da cidade e com rede de esgoto instalada até 1976.

Foram também identificados poços com teores de nitrato na faixa $5 \leq C \leq 10$ mg/L N-NO_3^- , ou mesmo acima do padrão de potabilidade (poço P109), em locais com rede de esgoto mais recente (1996).

Em áreas desprovidas de rede de esgoto, quase todos os poços cadastrados apresentam concentrações inferiores a 3 mg/L N-NO_3^- , exceto o poço P250, que, aliás, está acima do padrão de potabilidade.

de. É importante ressaltar que nesses locais a urbanização é mais recente e, portanto, as concentrações de nitrato dentro do Valor de Alerta (VA) ou acima do padrão de potabilidade ainda não foram detectadas.

A fim de analisar estatisticamente as relações entre as concentrações médias de nitrato, urbanização, rede de esgoto, densidade de ocupação urbana e profundidade dos poços, foram calculados os coeficientes gama de Goodman e Kruskal (γ) e averiguadas as dependências.

A tabela 3 apresenta os valores de γ , Nc, Nd e z obtidos a partir das análises estatísticas entre as variáveis supracitadas, considerando os resultados das análises químicas de 2019 e 2021.

Quando comparados os valores de z com os de Z crítico, para um nível significância de 5% (Tabela 4), é possível notar uma tendência de correlação entre as concentrações de nitrato e as idades da mancha urbana e da rede de esgoto, ao contrário do que ocorre com a densidade de ocupação urbana e a profundidade do poço. Isso indica que os dois primeiros atributos podem ser responsáveis pela ocorrência desse contaminante nas águas subterrâneas do SAB na área urbana de Baurio.

A ausência de correlação entre as concentrações de nitrato e a densidade de ocupação urbana pode estar relacionada à ausência de poços distribuídos nas áreas mais novas com ou sem acesso à

TABELA 3 - Coeficientes gama de Goodman e Kruskal (γ) calculados a partir das associações entre as variáveis categóricas concentração média de nitrato, idade da mancha urbana, idade da rede de esgoto, densidade de ocupação urbana e profundidade dos poços.

TABLE 3 – Goodman and Kruskal gamma coefficients (γ) calculated from the associations between mean nitrate concentration, urban expansion age, sewage network age, urban occupancy density, and well depth categorical variables.

<i>Concentração de nitrato X Idade da mancha urbana</i>					N	Nc	858
Idade da mancha urbana	Intervalo de concentração (C) de nitrato (mg/L)					N	Nd
	$0 \leq C < 3$	$3 \leq C < 5$	$5 \leq C \leq 10$	$C > 10$	γ		0,58
1990-2020	13	2	0	2	68	z	2,85
1960-1990	12	3	8	0			
1910-1960	6	5	9	8			
TOTAL	31	10	17	10			

<i>Concentração de nitrato X Idade da rede de esgoto*</i>					N	Nc	685
Idade da rede de esgoto	Intervalo de concentração (C) de nitrato (mg/L)					N	Nd
	$0 \leq C < 3$	$3 \leq C < 5$	$5 \leq C \leq 10$	$C > 10$	γ		0,61
2022	10	2	1	0	60	z	2,90
1996	11	2	8	2			
1976	4	5	8	7			
TOTAL	25	9	17	9			

*Excluídos 8 poços que estavam classificados como sem rede de esgoto

<i>Concentração de nitrato X Densidade de ocupação urbana**</i>					N	Nc	355
Densidade de ocupação urbana	Intervalo de concentração (C) de nitrato (mg/L)					N	Nd
	$0 \leq C < 3$	$3 \leq C < 5$	$5 \leq C \leq 10$	$C > 10$	γ		0,06
Muito baixa	2	0	0	0	57	z	0,19
Baixa	3	1	0	1			
Média	11	5	10	8			
Alta	4	0	4	1			
Muito alta	3	1	3	0			
TOTAL	23	7	17	10			

**Excluídos 11 poços que não estavam classificados quanto à densidade de ocupação urbana

<i>Concentração de nitrato X Profundidade do poço</i>					N	Nc	415
Profundidade do poço (P)	Intervalo de concentração (C) de nitrato (mg/L)					N	Nd
	$0 \leq C < 3$	$3 \leq C < 5$	$5 \leq C \leq 10$	$C > 10$	γ		-0,04
$P > 150$	0	0	1	0	68	z	-0,13
$100 < P \leq 150$	5	2	5	1			
$50 < P \leq 100$	22	5	11	6			
$0 < P \leq 50$	4	3	0	3			
TOTAL	31	10	17	10			

N = número de amostras; Nc = número total de pares concordantes; Nd = número total de pares discordantes; γ = coeficiente gama de Goodman e Kruskal; z = teste gama de significância.

TABELA 4 – Análise estatística entre os atributos idade da mancha urbana, idade da rede esgoto, densidade de ocupação urbana, profundidade dos poços e os valores médios das concentrações recentes de nitrato nos poços situados na área urbana da cidade de Bauru, considerando intervalo de significância de 5% e um Z crítico de 1,96.

TABLE 4 – Statistical analysis between the attributes: age of the urban area, age of the sewage network, urban occupancy density, well depth, and the mean values of recent nitrate concentrations in wells located in the urban area of the city of Bauru. A 5% significance range and a critical value of Z of 1.96 were considered.

Correlação	<i>z</i> calculado	Rejeita a hipótese nula?
Concentração de nitrato X Idade da mancha urbana	2,85	SIM
Concentração de nitrato X Idade da rede de esgoto	2,90	SIM
Concentração de nitrato X Densidade de ocupação urbana	0,19	NÃO
Concentração de nitrato X Profundidade do poço	-0,13	NÃO

rede de esgoto, ou pelo fato das áreas com maior densidade de ocupação urbana não se distribuírem na região central, mas em áreas mais periféricas, onde estão os poços com concentrações de nitrato no intervalo de Valor de Alerta ($5 \leq C \leq 10$ mg/L $N-NO_3^-$), ou ainda abaixo dele.

4.5 Evolução temporal das concentrações de nitrato

A figura 10 apresenta a evolução temporal das concentrações de nitrato no Sistema Aquífero Bauru (SAB) nos poços cadastrados na área urbana de Bauru. As concentrações encontram-se entre 0,01 e 23 mg/L $N-NO_3^-$ (Figura 10, Tabela 5). A observação dos valores de nitrato para todos os cinco períodos (1999-2003, 2004-2008, 2009-2013, 2014-2018 e 2019-2022) mostra que os centros e as distribuições dos dados estão abaixo do padrão de potabilidade. É possível notar uma tendência de aumento nas medianas (*Md*) com o tempo, de 0,20 a 3,29 mg/L $N-NO_3^-$, à exceção do último período (2019-2022), onde há um decréscimo de *Md*.

6 CONCLUSÕES

As concentrações de nitrato acima do padrão de potabilidade ou dentro do Valor de Alerta (VA) distribuem-se, em geral, nas áreas abrangidas pelas malhas urbanas anteriores a 1960, que possuem, majoritariamente, densidade de ocupação urbana média e redes de esgoto antigas (antes de 1976).

A relação entre o nitrato e as idades da mancha urbana e da rede esgoto pode ser melhor visualizada pelos resultados das análises estatísticas. Não foram observadas relações entre as concentrações de nitrato e profundidade dos poços, tam-

pouco entre os valores desse íon e a densidade de ocupação urbana.

O aumento nas concentrações médias do nitrato no Sistema Aquífero Bauru (SAB) ao longo das duas últimas décadas está relacionado à fuga da rede de esgoto.

Os resultados mostram que para se evitar a contaminação de aquíferos, a rede de esgoto deve ser instalada antes da ocupação urbana, com uso de materiais resistentes à corrosão, como o plástico, acompanhada de sua manutenção periódica.

A dinâmica da contaminação no SAB também auxiliou na consolidação de um modelo conceitual de contaminação do SAB para futura proposição de soluções de uso sustentável das águas subterrâneas na região.

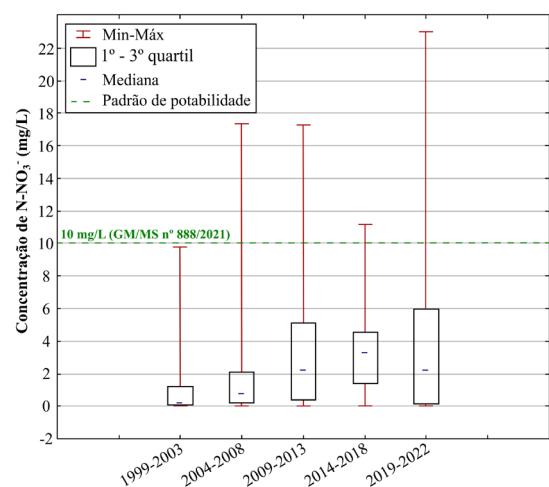


FIGURA 10 – Box-plots das concentrações de nitrato dos poços, entre 1999 e 2021 ($n = 278$ amostras).

FIGURE 10 – Box-plots of nitrate concentrations in drilling wells, between 1999 and 2021 ($n = 278$ samples).

TABELA 5 – Estatística dos dados de concentração de nitrato dos poços entre 1999 e 2021.

TABLE 5 – Statistics of nitrate concentration data from drilling wells between 1999 and 2021.

<i>Período</i>	<i>Número de amostras</i>	<i>Mediana - Md (mg/L)</i>	<i>Mínimo (mg/L)</i>	<i>Máximo (mg/L)</i>	<i>1º quartil (mg/L)</i>	<i>3º quartil (mg/L)</i>
1999-2003	19	0,20	0,01	9,80	0,07	1,20
2004-2008	89	0,80	0,01	17,30	0,20	2,08
2009-2013	43	2,20	0,01	17,29	0,41	5,15
2014-2018	17	3,29	0,02	11,17	1,43	4,54
2019-2022	110	2,25	0,02	23,00	0,17	6,00

7 AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos à FAPESP (Processos n. 2020/15434-0 e 2022/02681-4) e ao CNPq (Processo n. 423950/2021-5) pelo financiamento do projeto; aos pareceristas de Derbyana, pelas sugestões apresentadas que enriqueceram o manuscrito, ao DAE, SEPLAN e à Prefeitura Municipal de Bauru pelo fornecimento de dados e apoio técnico; ao funcionário do IPA/SEMIL, Gilberto Sanchez, aos técnicos do IPT e aos alunos de graduação e pós-graduação do IGc-USP, Vinicius Rogel Paulino de Oliveira, Carlos Gil Marques, Daniela Barbati e Wilson Gomes, pelo suporte nas atividades de campo e digitalização dos dados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEYEMI, O. 2011. Measures of association for research in educational planning and administration. *Research Journal of Mathematics and Statistics*, 3(3): 82–90.
- BARRETO, F.S.; BERTOLO, R.; VARNIER, C.L.; HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A.V.; TAVARES, T.; ALBUQUERQUE FILHO, J.L.; FERRARI, L.; MODESTO, R.P.; TOFFOLI, F.; LOOKIN, D. 2022. Modelagem de transporte reativo no entendimento da hidrogeoquímica do nitrato em aquífero urbano no município de Bauru (SP). In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 22, São Paulo, *Anais*, 2 p.
- BAURU. PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU. 1996. *Plano diretor de Bauru. Caderno*

de dados: Levantamentos diagnósticos. Bauru, 198 p.

- BAURU – PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU. 2016. *Diagnóstico técnico-participativo dos serviços de saneamento básico. Tomo III - Sistema de esgotamento sanitário*. Disponível em https://www2.bauru.sp.gov.br/arquivos/arquivos_site/sec_meioambiente/plano_saneamento/Arquivos/Sistema_de_Esgotamento_Sanit%C3%A1rio.pdf. Acessado em 07 set. 2023.
- BAURU – PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU. 2017. *Plano municipal de saneamento básico. Volume 1*. AMPLA Consultoria e Planejamento, Bauru, 873 p. Disponível em https://www2.bauru.sp.gov.br/semma/plano_saneamento.aspx. Acessado em 05 out. 2023.
- BAURU – PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU. 2018. *Lei Nº 7.116, de 26 de setembro de 2018. Define o perímetro urbano do Município de Bauru e dá outras providências*. Bauru, SP, 10 p. Disponível em https://sapl.bauru.sp.leg.br/pysc/download_norma_pysc?cod_norma=12103&texto_original=1. Acessado em 05 out. 2023.
- BAURU – PREFEITURA MUNICIPAL DE BAURU. 2022. *Projeto de lei de parcelamento, uso e ocupação do solo de Bauru e dá outras providências*. Prefeitura Municipal de Bauru, 36 p. Disponível em https://www2.bauru.sp.gov.br/arquivos/arquivos_site/sec_planejamento/plano_diretor/Minuta_LUOS.pdf. Acessado em 05 out. 2023.

- BENDAT, J S.; PIERSOL, A.G. 2010. *Random data: analysis and measurement procedures*. John Wiley & Sons, Hoboken, 4ª ed., 640 p.
- BRANDT NETO, M. 1984. *O Grupo Bauru no centro-oeste do Estado de São Paulo*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 106 p. + anexos. Disponível em <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44132/tde-22072015-085122/es.php>
- BRASIL. 1979. *Lei n.º 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o parcelamento e uso do solo urbano e dá outras providências*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, seção 1, p. 19457, 20 dez. 1979. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm. Acessado em 05 out. 2023.
- BRASIL. Ministério da Saúde. 2021. *Portaria GM/MS Nº 888, de 04 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, n. 85, 07.mai.2021. Disponível em <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acessado em 07 set. 2023.
- CAGNON, F.; HIRATA, R. 2004. Source of nitrate in the groundwater of Adamantina aquifer in Urânia, SP - Brazil. In: IAH, INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROGEOLOGIST CONGRESS, 33, Zacatecas, *Atas*, 7 p.
- CANATO, H.M. CONCEIÇÃO, F.T.; HAMADA, J.; MORUZZI, R.B.; NAVARRO, G.R.B. 2014. Caracterização hidrogeoquímica do aquífero Adamantina na área urbana de Bauru, SP. *Ciência & Engenharia*, 23(2): 39–47. <https://dx.doi.org/10.14393/19834071.2014.24758>
- CAPELOZZA, A.C.A. 2016. *Os bairros Jardim Estoril: a atuação das empresas Martha no setor sul de Bauru-SP (1957-2008)*. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, Dissertação de Mestrado, 156 p. <https://doi.org/10.11606/D.102.2016.tde-13102016-111425>
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2004. *Qualidade das águas subterrâneas do Estado de São Paulo 2001-2003*. CETESB, São Paulo, 103 p. (Série Relatórios). Disponível em <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/publicacoes-e-relatorios/>. Acessado em 07 set. 2023.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2022. *Qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2019-2021*. CETESB, São Paulo, 242 p. (Série Relatórios). Disponível em https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/wp-content/uploads/sites/13/2023/06/QualidadeAguasSubterraneas-2019-2021_F.pdf. Acessado em 11 set. 2023.
- DAE – DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO DE BAURU. 1976. *Sistema de Abastecimento de Água - RTP. Cadastro informativo da rede coletora de esgoto. Ano base 1976. Escala 1:10.000*. COPLASA S.A., Bauru (Documento interno).
- DAE – DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO DE BAURU. 2021. *Tratamento de esgoto em Bauru*. Disponível em <https://www.daebauru.sp.gov.br/empresa.php?item=CT2>. Acessado em 07 set. 2023.
- DAE – DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO DE BAURU. 2022. *Cadastro informativo da rede coletora de esgoto. Ano base 2022*. (Documento interno).
- DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 2015. *Diagnóstico hidrogeológico e a elaboração de propostas para a gestão dos recursos hídricos subterrâneos no município de Bauru/SP*. DAEE/C3 Consultoria, São Paulo. Relatório Técnico Final, v. 1, Tomo I, 197 p.
- DANIEL, W.W. 1978. *Applied nonparametric statistics*. Houghton Mifflin Company, Boston, 1ª ed., 503 p.
- DAMASCENO, B.C. 2021. *Habitação social e desenvolvimento urbano em cidades médias. Canal 6, Bauru, 1ª ed., 280 p.*

- DAMASCENO, B.C.; GOULART, J.O. 2021. Habitação social, espaço urbano e segregação socioespacial: análise comparada entre Bauru e Piracicaba. In: PLURIS, CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO PARA O PLANEJAMENTO URBANO, REGIONAL, INTEGRADO E SUSTENTÁVEL, 9, Águas de Lindóia, *Anais*, 12 p.
- DAVIS, J.C. 1986. *Statistics and data analysis in geology*. John Wiley & Sons Inc., New York, 2ª ed., 646 p.
- GIAFFERIS, G.P.; OLIVEIRA, E.L. 2006. Investição da qualidade das águas subterrâneas do município de Bauru. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14, Curitiba, *Anais*, 10 p.
- GOOGLE. 2023. Google Earth website. <http://earth.google.com/>, 2023.
- HIRATA, R. 2000. *Estudo da contaminação por nitrato no Distrito de Tibiriçá, Bauru*. DAE/IGc-USP, São Paulo, 2 v. (Relatório Técnico).
- HIRATA, R.; CAGNON, F.; BERNICE, A.; MALDANER, C.H.; GALVÃO, P.; MARQUES, C.; TERADA, R.; VARNIER, C.; RYAN, M.C.; BERTOLO, R. 2020. Nitrate contamination in Brazilian urban aquifers: A tenacious problem. *Water*, 12(10): 2709. <https://doi.org/10.3390/w12102709>
- HIRATA, R.; BARBATI, D.; MARQUES, C.H.G. 2022. Quantas águas existem na cidade de Bauru (SP)? In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 22, São Paulo, *Anais*, 2 p.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2022. *Cidades: Bauru*. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/bauru/panorama>. Acessado em 07 set. 2023.
- IG – INSTITUTO GEOLÓGICO. 2012. *Padrões de ocupação urbana e contaminação por nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, centro-oeste do estado de São Paulo*. São Paulo, SMA/FAPESP, 39 p. (Relatório Técnico Final).
- JAKÓBCZYK-KARPIERZ, S.; ŚLÓARCZYK, K. 2022. Isotopic signature of anthropogenic sources of groundwater contamination with sulfate and its application to groundwater in a heavily urbanized and industrialized area (Upper Silesia, Poland). *Journal of Hydrology*, 612: 128255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128255>
- LEHMANN, E.L. 1975. *Nonparametrics, statistical methods based on ranks*. Holden-Day Inc., Toronto, 1ª ed., 457 p.
- LOPES JR, W.M. 2007. *Centro, periferia e novas centralidades em cidade média: o caso de Bauru - SP*. Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Tese de Doutorado, 262 p. <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2007.411921>
- MAIA, C.A. 2019. *Descontinuidade territorial e formação de vazios urbanos: Um padrão de crescimento em cidades médias paulistas*. Instituto de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Dissertação de Mestrado, 246 p. <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2019.1091573>
- MARQUES, C.H.G.; TERADA, R.; GALVÃO, P.G.; HIRATA, R. 2019. Evolução espacial e temporal da contaminação por nitrato no aquífero urbano de Urânia (SP). *Revista Águas Subterrâneas*, 33(3): 258–269. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i3.29524>
- MONTANHEIRO, F.; CHANG, H.K. 2016. Nitrato no Aquífero Adamantina: O caso do município de Monte Azul Paulista. *Revista do Instituto Geológico*, 37(2): 25–44. <http://doi.org/10.5935/0100-929X.20160007>
- PAULA E SILVA, F. 1988. Exploração do sistema aquífero Bauru na cidade de Bauru: O condicionamento tectônico na avaliação do potencial hídrico da área. In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 5, São Paulo, *Atas*, 63–73.
- PAULA E SILVA, F.; CAVAGUTI, N. 1994. Nova caracterização estratigráfica e tectônica do Mesozóico na cidade de Bauru – SP. *Revista Geociências*, 13(1): 83–99.
- PAULA E SILVA, F.; CHANG, H.K.; CAETANO-CHANG, M.R. 2005. Estratigrafia de sub-superfície do Grupo Bauru (K) no Estado de

- São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*, 35(1): 77–88.
- PILEGGI, F.; HIRATA, R.; CONICELLI, B.; ARANDA, N. 2021. Support method for interpretation of regional groundwater monitoring in urban areas. *Brazilian Journal of Geology*, 51: 1–10. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202120200053>
- REDDY, C.K.V.C.; GOLLA, V.; BADAPALLI, P.K.; REDDY, N.B.Y. 2022. Evaluation of groundwater contamination for fluoride and nitrate in Nellore Urban Province, Southern India: A special emphasis on human health risk assessment (HHRA). *Applied Water Science*, 12: 32. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01537-8>
- ROSENBERGER, M.; VARNIER, C.; IRITANI, M.A.; FERREIRA, L.M.R.; ODA, G.H.; VIOTTI, M. 2013. Mapeamento da vulnerabilidade natural à contaminação do Sistema Aquífero Bauru na área urbana do município de Bauru (SP). *Revista do Instituto Geológico*, 34(2): 51–57. <https://doi.org/10.5935/0100-929X.20130009>
- ROSSI, M. 2016. *Paisagens e muros: um olhar sobre a urbanização fechada na zona sul de Bauru*. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 173 p. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/144657>.
- ROSSI, M.; CONSTANTINO, N.R.T. 2015. Cidade contemporânea e o projeto de espaços residenciais fechados: o caso de Bauru-SP. In: UFRN/UFPB, SEMINÁRIO PROJETAR, ORIGINALIDADE, Natal, *Anais*, 1–13. Disponível em <http://projedata.grupoprojetar.ct.ufrn.br/dspace/handle/123456789/967>.
- SÃO PAULO – ESTADO. 2006. *Plano Estadual dos Recursos Hídricos 2004-2007 do Estado de São Paulo: relatório síntese do plano*. IG/ CPLA, São Paulo, 12 p. Disponível em <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7006/perh.pdf>. Acessado em set. 2023.
- SÃO PAULO – ESTADO. 2014. *Sistema de classificação Unidades Homogêneas de Cobertura da Terra e do Uso e Padrão da Ocupação Urbana (UHCT) e mapeamento da vulnerabilidade de áreas urbanas de uso residencial/comercial/serviços a eventos geodinâmicos do Estado de São Paulo*. IG/CPLA, São Paulo, 12 p. Disponível em https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutogeologico/wp-content/uploads/sites/233/2016/06/Ficha_Tecnica_UHCT_2016.pdf.
- SEMMA - SECRETARIA MUNICIPAL DE MEIO AMBIENTE DE BAURU. 2008. *Mapa geomorfológico*. Diagnóstico Ambiental e dos Recursos Hídricos do Município de Bauru, Bauru. Disponível em https://www2.bauru.sp.gov.br/arquivos/arquivos_site/sec_meio-ambiente/diagnostico_ambiental/Mapas/Geomorfológico1_50.pdf.
- SEPLAN – SECRETARIA MUNICIPAL DE PLANEJAMENTO DE BAURU. 2022a. *Mapa da expansão da mancha urbana*. SEPLAN. Bauru.
- SEPLAN – SECRETARIA MUNICIPAL DE PLANEJAMENTO DE BAURU. 2022b. *Mapa zoneamento urbano*. Bauru, SEPLAN. Disponível em https://www2.bauru.sp.gov.br/arquivos/arquivos_site/sec_planejamento/plano_diretor/Mapa_1.pdf.
- SIEGEL, S. 1975. *Estatística não paramétrica: para as ciências do comportamento*. McGraw-Hill, São Paulo, 350 p.
- SILVA, R.S. 2009. *Caracterização hidrogeológica dos sistemas aquíferos Bauru e Guarani no município de Bauru*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 115 p. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/92830>.
- SIMONATO, M.D.; LEITÃO, A.C.F.; BRANDÃO, D.; PAULA E SILVA, F.; PAULA, V.F.; CAMPOS, J.E. 2016. Há conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos Guarani e Bauru na “janela” de basalto, em Bauru-SP? In: ABAS, CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 19, Campinas, *Anais*, 20 p.
- SNEYERS, R. 1990. *On the statistical analysis of series of observations*. WMO, Genebra, 218 p. (Nota Técnica, 143). Disponível em <https://library.wmo.int/records/item/30743-on-the-statistical-analysis-of-series-of-observations>. Acessado em 20 dez. 2023.

- SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. 2019. *Diagnóstico dos serviços de água e esgotos – Ano base 2017*. SNS/MDR, Brasília, 226 p. Disponível em https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/diagnosticos-antiores-do-snis/agua-e-esgotos-1/2019/2-Diagnostico_SNIS_AE_2019_Publicacao_31032021.pdf.
- SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. 2021. *Diagnóstico temático: Serviços de água e esgoto. Visão Geral – Ano base 2020*. SNS/MDR, Brasília. Disponível em https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_AE_SNIS_2021.pdf.
- SOARES, F.P. 1996. *Expansão do processo de favelamento da cidade de Bauru*. Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Universidade Estadual Paulista, Bauru, Dissertação de Mestrado, 164 p.
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, V.J.; SOBREIRO NETO, A.F. 1980. Ensaio de caracterização estratigráfica do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*, 3: 177–185.
- STRADIOTO, M.R.; TERAMOTO, E.H.; CHANG, H.K. 2019. Nitrato em águas subterrâneas do Estado de São Paulo. *Revista do Instituto Geológico*, 40(3): 1–12. <http://doi.org/10.33958/revig.v40i3.672>
- SUHOGUSOFF, A.V.; HIRATA, R.; FERRARI, L.C.K.M. 2013. Water quality and risk assessment of dug wells: A case study for a poor community in the city of São Paulo, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 68: 899–910. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1971-x>
- TERADA, R.K. 2022. *Influência da infraestrutura urbana nas águas subterrâneas na cidade de Urânia (SP)*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 118 p. Disponível em <https://doi.org/10.11606/T.44.2022.tde-08092022-091748>.
- TORRES-MARTÍNEZ, J.A.; MORA, A.; KNAPPETT, P.S.K.; ORNELAS-SOTO, N.; MAHLKNECHT, J. 2020. Tracking nitrate and sulfate sources in groundwater of an urbanized valley using a multi-tracer approach combined with a Bayesian isotope mixing model. *Water Research*, 182: 115962. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115962>
- VARNIER, C.; IRITANI, M.A.; VIOTTI, M.; ODA, G.H.; FERREIRA, L.M.R. 2010. Nitrato nas águas subterrâneas do Sistema Aquífero Bauru, área urbana do município de Marília (SP). *Revista do Instituto Geológico*, 31(1-2): 1-21. <http://doi.org/10.5935/0100-929X.20100001>
- VARNIER, C.; IRITANI, M.A.; VIOTTI, M.; ODA, G.H.; FERREIRA, L.M.R. 2012. Relación entre la urbanización y la contaminación por nitrato en el Sistema Acuífero Bauru (Ciudad de Bauru, Brasil). In: ALHSUD, CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDROGEOLOGÍA, 11, Cartagena de Índias, *Anais*, 5 p.
- VARNIER, C.; HIRATA, R.; ARAVENA, R. 2017. Examining nitrogen dynamics in the unsaturated zone under an inactive cesspit using chemical tracers and environmental isotopes. *Applied Geochemistry*, 78: 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.12.022>
- VARNIER, C.; SUHOGUSOFF, A.V.; HIRATA, R.; ARAVENA, R. 2021. Uso dos isótopos ¹⁵N e ¹⁸O em nitrato e a sua importância em estudos de contaminação de aquíferos urbanos na América Latina. *Derbyana*, 42: e738. <https://doi.org/10.14295/derb.v42.738>
- ZENDEHBAD, M.; CEPUDER, P.; LOISKANDL, W.; STUMPP, C. 2019. Source identification of nitrate contamination in the urban aquifer of Mashhad, Iran. *Journal of Hydrology, Regional Studies*, 25: 100618. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100618>

Endereço dos autores:

Fernanda Souto Barreto* (ID 0000-0002-9891-5203), Deborah Lookin (ID 0000-0002-8303-1261), Alexandra Suhogusoff (ID 0000-0001-7925-4094), Luiz Carlos Ferrari (ID 0000-0003-3953-3974), Reginaldo Bertolo (ID 0000-0002-9470-4716) e Ricardo Hirata (ID 0000-0001-9683-1244) – Centro Pesquisas de Águas Subterrâneas – CEPAS/USP, Rua do Lago, 562, Cidade Universitária, CEP: 05508-080, São Paulo, SP, Brasil. *E-mails:* fernandasouto@usp.br, deborah.lookin@usp.br, suhogusoff@usp.br, lf.modcom@gmail.com, bertolo@usp.br, rhirata@usp.br

Claudia Varnier (ID 0000-0002-3607-1703) – Instituto de Pesquisas Ambientais – SEMIL, Rua Joaquim Távora, 822, Vila Mariana, CEP: 04015-011, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* claudia.varnier@sp.gov.br

Tatiana Tavares (ID 0000-0001-5889-624X) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás – FCT/UFG, Estrada Municipal Quadra e Área Lote 04, Bairro Fazenda Santo Antônio, Aparecida de Goiânia, CEP: 74971-451, GO, Brasil. *E-mail:* tatianatavares@ufg.br

José Luiz Albuquerque Filho (ID 0000-0002-7760-9514) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente, Seção de Planejamento Territorial, Recursos Hídricos, Saneamento e Florestas – IPT/CIMA/SPRSF, Av. Prof. Almeida Prado, nº 532, Prédio 59, Cidade Universitária, CEP: 05508-901, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* albuzeu@ipt.br

Fabiano Toffoli (ID 0000-0001-5321-6487) e Rosângela Pacini Modesto (ID 0000-0002-9948-429X) – Setor da Águas Subterrâneas, Solo e Vegetação, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, EQAA/CETESB, Rua Prof. Frederico Hermann Júnior, 345, CEP. 05459-900, São Paulo, SP, Brasil. *E-mails:* ftoffoli@sp.gov.br, rmodesto@sp.gov.br

*Autor correspondente

Artigo submetido em 11 de outubro de 2023, aceito em 22 de dezembro de 2023.

