



Qualidade da água subterrânea na área urbana de Uberaba-MG: avaliação de risco à saúde

Groundwater quality in the Uberaba-MG urban area: health risk assessment

C. R. Rezende¹; J. C. V. Campos²; V. S. R. Melo¹; C. S. Machado³; A. P. M. S. Senhuk^{1,2}; D. C. Ferreira^{1,2*}

¹Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba-MG, Brasil

²Departamento de Engenharia Ambiental, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba-MG, Brasil

³Laboratório de Ecotoxicologia e Parasitologia Ambiental, Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto da Universidade São Paulo, Ribeirão Preto-SP, Brasil

* deusmaque.ferreira@ufm.edu.br

(Recebido em 13 de novembro de 2022; aceito em 28 de fevereiro de 2023)

Apesar de sua importância do ponto de vista social e econômico, e de serem mais protegidas que as águas superficiais, as águas subterrâneas podem ser contaminadas por diversas fontes, comprometendo sua qualidade para abastecimento e demandando alto investimento financeiro e de recursos humanos para sua remediação. Nesse contexto, o objetivo do presente estudo foi analisar a qualidade da água subterrânea em 8 (oito) poços distribuídos nos bairros da cidade de Uberaba-MG e avaliar o risco à saúde com base na concentração de metais potencialmente tóxicos e de íons nitrato. Os parâmetros analisados na estação seca e chuvosa foram de caráter microbiológico (Coliformes totais e termotolerantes), físico (condutividade, temperatura, turbidez e cor) e químico (pH, metais potencialmente tóxicos, alcalinidade, demanda química de oxigênio, fósforo total, nitrato, cloreto e dureza). Todos os poços analisados apresentaram coliformes totais e termotolerantes em pelo menos uma estação. Ao comparar com a legislação vigente, os parâmetros cor, DQO, fósforo total, ferro, cádmio, chumbo, níquel, manganês e cromo apresentaram valores acima dos limites permitidos, principalmente no período seco. A análise de risco à saúde mostrou-se significativa para quatro poços estudados, sendo cádmio o parâmetro com os maiores coeficientes de risco, seguido por cromo. Essas alterações precisam ser constantemente monitoradas a fim de conhecer a real qualidade da água subterrânea para consumo. Assim, os resultados encontrados contribuem para o delineamento de estudos futuros, servindo como subsídio para gestores ambientais e de saúde pública.

Palavras-chave: análises físico-químicas, análises microbiológicas, índice de risco.

Despite its importance from the social and economic point of view, and being more protected than surface waters, groundwater can be contaminated by several sources, compromising its quality for supply and requiring high financial and human resources investment for its remediation. The objective of the present study was to analyze the quality of groundwater in 8 wells distributed in neighborhoods of the city of Uberaba-MG and to evaluate the health risk based on the concentration of potentially toxic metals and nitrate ions. The parameters analyzed in the dry and rainy seasons were microbiological (total and thermotolerant coliforms), physical (conductivity, temperature, turbidity and color) and chemical (pH, potentially toxic metals, alkalinity, chemical oxygen demand, total phosphorus, nitrate, chloride and hardness). All the wells analyzed presented total and thermotolerant coliforms in at least one station. When compared to the legislation in force, the parameters color, COD, total phosphorus, iron, cadmium, lead, nickel, manganese and chromium presented values above the allowed limits, especially in the dry season. The health risk analysis was significant for four wells studied, being cadmium the parameter with the highest risk coefficients, followed by chromium. These changes need to be constantly monitored in order to know the real quality of groundwater for consumption. Thus, the results found contribute to the design of future studies, serving as a subsidy for environmental and public health managers.

Keywords: physicochemical analysis, microbiological analysis, risk index.

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas contribuem para a perenidade de muitos rios brasileiros e, por serem relativamente abundantes e de boa qualidade, são frequentemente utilizadas para abastecimento

público e privado, além de outras atividades como em sistemas autônomos residenciais, indústrias, irrigação agrícola e lazer [1]. Vale ressaltar que é garantido por lei que todo cidadão tenha acesso à água em quantidade e qualidade satisfatórias para consumo. No Brasil, a Norma de Qualidade da Água para consumo humano segue a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que define os valores máximos permitidos, recomendados e aceitáveis para as características físicas, químicas e bacteriológicas da água potável [2].

Entretanto, a proteção da qualidade das águas subterrâneas ainda é bastante negligenciada em diversas partes do país [3]. Apesar de sua importância do ponto de vista social e econômico, e de serem naturalmente mais protegidas que as águas superficiais, podem ser contaminadas por diversas fontes, o que demanda um alto investimento financeiro e de recursos humanos para sua remediação [4]. As águas subterrâneas podem ser contaminadas por percolação de chorume de lixões, aterros mal operados e cemitérios, além de acidentes com substâncias tóxicas, atividades inadequadas de armazenamento, manuseio e descarte de matérias primas, produtos, efluentes e resíduos, atividades minerárias que expõem o aquífero, uso incorreto de agrotóxicos e fertilizantes, bem como a presença de poços mal construídos ou operados [4-6].

No município de Uberaba, ocorrem três importantes aquíferos: o Bauru, Serra Geral e Guarani. O aquífero Bauru é o mais raso e vulnerável à contaminação, seja por atividades agrícolas em meio rural ou por vazamento da rede de esgotamento sanitário, disposição inadequada dos resíduos sólidos, vazamentos de postos de combustíveis, dentre outros, em meio urbano. O aquífero Serra Geral, que se encontra abaixo do aquífero Bauru, também está sujeito à contaminação pelas atividades antrópicas, uma vez que possui conexão hidráulica com o aquífero sotoposto. De forma geral, as águas desse aquífero atendem aos padrões de potabilidade do Ministério da Saúde, mas apresentam concentrações baixas de cálcio e magnésio; com isso tendem a dissolver carbonato de cálcio (CaCO_3), que muitas vezes podem ser vulneráveis à corrosão [7]. O aquífero Guarani é o mais profundo e, por se tratar de um aquífero confinado, encontra-se isolado hidráulicamente dos aquíferos sotopostos.

A água potável para abastecimento público da cidade de Uberaba-MG é retirada do principal rio que corta a região (Rio Uberaba), contudo há inúmeros poços tubulares autorizados pela agência responsável do Estado, distribuídos na área urbana, os quais retiram água dos aquíferos Bauru, Serra Geral e Guarani. A maioria desses poços são relativamente rasos (em torno de 100 m de profundidade), sendo mais suscetíveis à contaminação pelas atividades antrópicas, o que pode comprometer a qualidade da água [8].

Nesse contexto, o presente estudo propõe a caracterização da água de poços tubulares na área urbana de Uberaba-MG e a avaliação de risco à saúde com base na concentração de metais potencialmente tóxicos e de nitrato, indicador de poluição difusa por atividades agrícolas e esgotos sanitários.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na área urbana do município de Uberaba-MG, localizado na região do Triângulo Mineiro, com população estimada em 337 mil habitantes [9]. A região estudada é caracterizada pela ocorrência de três importantes aquíferos: Bauru, Serra Geral e, mais isoladamente, o Guarani.

Estratigraficamente, o aquífero Bauru é a unidade intergranular mais superior, formado por rochas sedimentares, sendo representado na região do Triângulo Mineiro pelas formações Uberaba, Marília e Vale do Rio do Peixe. Na área de estudo, ela é representada apenas pela Formação Uberaba constituída por arenitos siltosos e argilosos [10]. De acordo com Agência Nacional das Águas (ANA), seu pH geralmente é encontrado entre os valores de 7 e 10, apresentando-se em boa qualidade para o consumo humano. O manganês pode estar presente em alguns poços; porém, em limite tolerável para o consumo, o que leva a água a ter um comportamento bicarbonatada cálcica magnésiana [11].

A Formação Serra Geral ocorre logo abaixo da Formação Uberaba e é constituída por rochas de origem vulcânica, tais como basaltos toleíticos e andesitos basálticos, ocorrendo subordinadamente riolitos e riodacitos. Na região de Uberaba, o Serra Geral é um dos principais aquíferos explorados por meio de vários poços tubulares, embora seja um sistema fraturado, e pode alcançar mais de 400 metros de espessura [12].

O aquífero Guarani, na região de Uberaba, é constituído pela Formação Botucatu, sendo confinado pela Formação Serra Geral. A Formação Botucatu é constituída por arenitos de granulação fina a média, que se depositaram na bacia sedimentar do Paraná [13]. Os poços que captam água do aquífero Guarani ocorrem, em média, com profundidades superiores a 440 m [12]. Suas águas tendem a apresentar uma característica bicarbonatada magnésiana; porém, dados hidroquímicos em outras regiões indicam que pode ocorrer interconexão hidráulica entre o Guarani e os aquíferos sotopostos a ele, em especial o Serra Geral, acarretando uma mistura das águas e, conseqüentemente, alterando a qualidade natural da água [12].

As amostras de água foram coletadas de oito poços tubulares na área urbana em frascos de vidro de 500 mL previamente esterilizados, na estação chuvosa e seca de 2018 (abril e outubro). Desses poços, coordenadas geográficas (Tabela 1), sete captam água do aquífero Serra Geral (A, B, C, D, E, F e G) e um (H), do aquífero Guarani (Figura 1).

Tabela 1: Coordenadas geográficas dos oito poços tubulares na área urbana de Uberaba-MG.

Poços	Latitude	Longitude
A	19°44'54.56"S	47°58'31.45"O
B	19°45'53.32"S	47°57'44.29"O
C	19°45'9.98"S	47°56'25.39"O
D	19°43'59.78"S	47°56'22.92"O
E	19°42'35.57"S	47°57'41.45"O
F	19°44'30.98"S	47°53'45.21"O
G	19°45'48.55"S	47°54'50.44"O
H	19°46'10.63"S	47°55'21.47"O

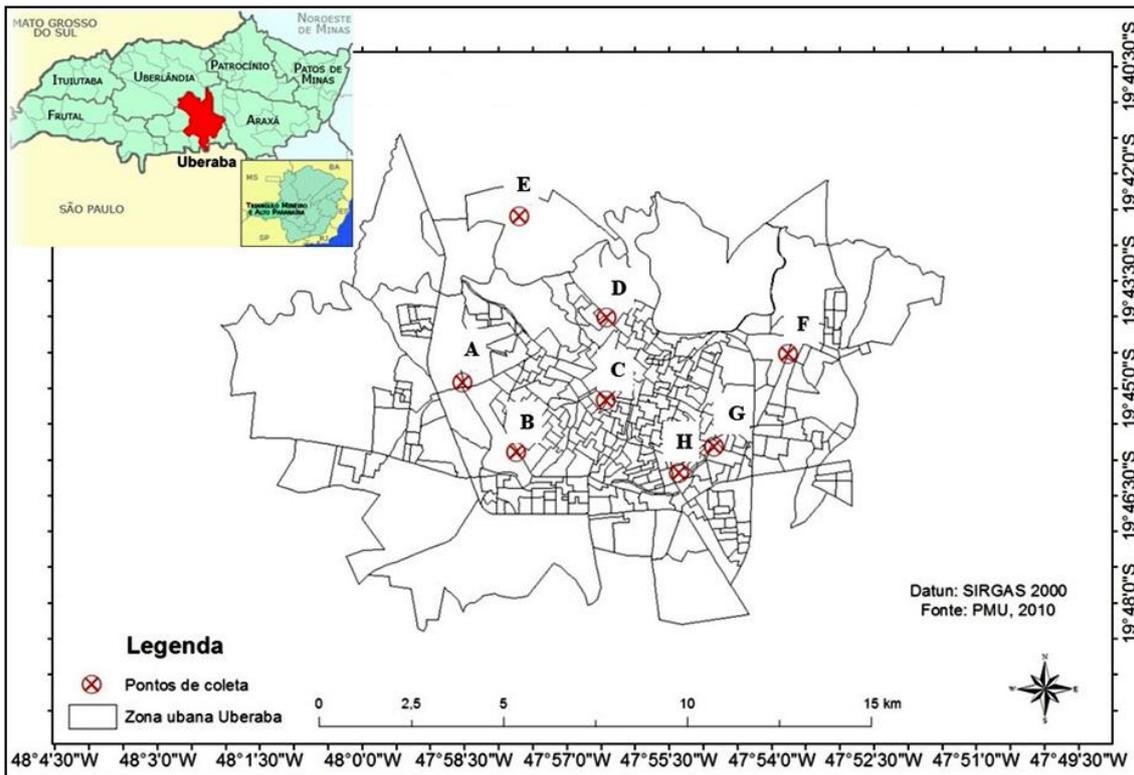


Figura 1: Localização dos poços tubulares (pontos de coleta) no perímetro urbano da cidade de Uberaba-MG.

2.2 Parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água

Os parâmetros físicos (turbidez, cor e condutividade) e químicos (pH, alcalinidade, acidez, demanda química de oxigênio, cloreto, nitrato e fósforo total) foram analisados em triplicata para cada amostra de água, conforme descrito pelo “Standart Methods for the Examination of Waterand Wastewater” da American Public Health Association [14].

As análises de metais potencialmente tóxicos foram realizadas por espectrometria de emissão atômica com plasma induzido por micro-ondas (MP-AES 4200), em duplicata. A abertura das amostras foi realizada por via úmida. Transferiu-se 10 mL de cada amostra para um tubo de ensaio de 100 mL. Na sequência, adicionou-se 10 mL da mistura dos ácidos nítrico e clorídrico (1:1). Após aquecimento a 150°C por 30 min. em bloco digestor SCR, a mistura foi avolumada para 50 mL com água destilada. O branco foi preparado pela adição de 0,10 mL dos ácidos nítrico e clorídrico (1:1) e avolumado para 50 mL com água deionizada.

Nas análises microbiológicas, utilizou-se o método com o substrato cromogênico definido ONPG-MUG (Colilert). Obtiveram-se resultados positivos para coliformes totais quando a mistura adquiriu uma coloração amarelada e positiva para coliformes termotolerantes, quando a mistura de cor amarelada apresentou uma luminescência ao ser colocada perante uma luz ultravioleta.

2.3 Análise dos dados

Os parâmetros físico-químicos foram comparados entre as estações seca e chuvosa, independentemente do ponto de coleta, pelo teste t de Student ($p < 0,05$) e correlacionados entre si pelo cálculo do coeficiente de Pearson, por meio do software BioEstat 5.3.

Os valores encontrados para cada parâmetro analisado (físico, químico e microbiológico) também foram comparados com os padrões de potabilidade da Portaria GM/MS nº 888/2021 [2], que dispõem sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano.

A análise de risco à saúde dos consumidores de água dos poços estudados foi feita pela concentração de metais potencialmente tóxicos (Cd, Co, Cr, Mn, Ni, Zn) e de íons de nitrato, com base na dose de referência desses parâmetros, disponibilizada pela EPA [15]. Para isso foi calculado o Índice de Risco (do inglês *Hazard Index* - HI), o qual é a somatória dos Coeficientes de Risco (do inglês *Hazard Quotient* - HQ) de cada parâmetro considerado, segundo as equações 1 e 2:

$$HQ = Iw/RfD \quad (1)$$

$$Iw = (CF \cdot IRw \cdot Efw \cdot ED) / (Bw \cdot AT) \quad (2)$$

Sendo:

Iw – Ingestão de água

RfD – Dose de referência (mg kg⁻¹ L⁻¹): Cd=0,0005; Cr=0,003; Cu=0,04; Mn=0,14; Ni=0,02; Zn=0,3; íons nitrato=1,6 [15]

CF - Concentração do elemento na água: dados do presente estudo (mg L⁻¹)

IRw - Taxa de ingestão de água: 1,26 L dia⁻¹ [16]

Efw - Frequência de exposição à água: 220 dias ano⁻¹ (média de dias trabalhados no ano)

ED - Duração da exposição: 35 anos (média de anos trabalhados)

Bw - Peso corporal adulto: 67,6 kg [17]

AT - Tempo médio para efeito não carcinogênico: 4.146 dias [18]

Por fim, os poços tubulares foram comparados pela análise hierárquica de clusters (AC-dendograma), a fim de visualizar a formação de grupos espaciais mais similares quanto às características físico-químicas da água.

3. RESULTADOS

3.1 Parâmetros físico-químicos

Os resultados das análises físico-químicas e microbiológicas da água dos oito poços estudados, nos dois períodos de coleta (seco e chuvoso), bem como os VMP (valor máximo permitido) da Portaria GM/MS nº 888/2021 [2] estão apresentados na Tabela 2. Os seguintes parâmetros apresentaram diferença entre as estações, com maiores valores encontrados no período seco: cor (p=0,03), fósforo total (p=0,04) e alcalinidade (p < 0,0001). Ao comparar com a legislação vigente, os parâmetros cor, DQO e fósforo total apresentaram valores acima dos VMP em dois ou mais poços analisados.

Tabela 2: Características físico-químicas e microbiológicas da água dos poços analisados na área urbana de Uberaba-MG.

Parâmetro	Estação DP	Poços								VMP
		A	B	C	D	E	F	G	H	
Turbidez (NTU)	Seca	0,20	0,20	0,10	0,10	0,10	0,20	0,20	0,10	5,00
	DP	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,03	0,01	0,01	
	Chuvosa	0,30	0,10	0,10	0,00	0,10	0,10	0,10	0,10	
	DP	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,01	
Cond. elétrica (µS cm ⁻¹)	Seca	66,4	104,8	275,0	115,8	141,0	170,0	430,0	139,0	---
	DP	1,7	1,4	2,4	1,7	2,6	1,9	3,5	1,9	
	Chuvosa	55,5	107,5	44,6	113,5	123,0	163,6	370,0	116,8	
	DP	1,7	1,2	0,9	1,8	1,3	1,7	2,9	1,5	
Cor	Seca	16,70	3,00	7,50	12,10	53,10	34,90	53,10	53,10	15

(mgPt L ⁻¹)	DP	0,08	0,06	0,09	0,47	0,38	0,27	0,85	0,47	
	Chuvosa	3,00	3,00	2,20	7,50	3,00	34,90	3,00	25,80	
pH	DP	0,11	0,13	0,14	0,17	0,14	1,70	0,25	0,19	
	Seca	6,00	7,00	7,40	8,20	8,40	8,00	6,80	7,10	6-9,5
	DP	0,28	0,13	0,34	0,22	0,14	0,12	0,15	0,49	
	Chuvosa	6,20	7,00	7,20	7,81	8,50	7,90	6,80	7,00	
Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	DP	0,21	0,09	0,11	0,13	0,08	0,11	0,10	0,26	
	Seca	23,01	63,00	114,2	47,02	81,03	80,06	111,2	70,04	400
	DP	0,19	1,25	1,5	1,10	1,05	1,32	1,4	0,72	
	Chuvosa	3,00	6,00	10,00	7,03	8,01	5,02	6,01	7,02	
DQO (mg L ⁻¹)	DP	0,03	0,05	0,51	0,10	0,08	0,12	0,24	0,72	
	Seca	17,80	39,60	23,80	19,80	3,00	2,00	2,00	9,90	3
	DP	1,18	1,05	1,50	0,90	0,35	0,02	0,06	0,22	
	Chuvosa	17,80	11,90	15,90	6,00	10,90	24,80	71,30	13,90	
Fósforo total (mg L ⁻¹)	DP	1,01	0,55	0,30	0,07	2,35	2,09	8,09	2,22	
	Seca	0,10	0,30	0,03	0,13	0,19	0,02	0,26	0,04	0,100
	DP	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,01	
	Chuvosa	0,01	0,04	0,03	0,06	0,10	0,01	0,20	0,04	
Dureza total (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	DP	0,00	0,01	0,01	0,01	0,04	0,00	0,00	0,01	
	Seca	23	73	173	53	53	95	170	62	300
	DP	1,05	1,10	2,34	0,69	0,25	1,15	0,85	0,35	
	Chuvosa	30,05	73,24	150,4	59,89	48,35	85,22	170,4	60,91	
Dureza cálcica (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	DP	1,45	1,02	1,4	0,77	0,23	0,37	1,2	0,56	
	Seca	20,28	53,43	109,5	44,25	39,33	50,42	136,6	43,90	500
	DP	1,04	1,07	1,2	0,17	0,15	0,35	1,6	0,38	
	Chuvosa	26,14	44,45	119,7	51,36	38,27	64,19	105,2	45,17	
Dureza magnésiana (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	DP	0,04	0,07	0,3	0,07	0,11	0,18	0,8	0,18	
	Seca	3,04	20,71	64,32	9,05	14,29	45,67	34,15	19,70	500
	DP	0,16	0,14	0,34	0,15	0,43	0,26	0,72	0,17	
	Chuvosa	4,18	29,11	31,88	8,54	10,65	21,19	65,41	15,81	
Íon Cloreto (mg L ⁻¹)	DP	0,10	0,03	0,16	0,04	0,13	0,17	0,41	0,11	
	Seca	5,00	5,00	15,00	5,00	5,00	15,00	10,00	5,00	250
	DP	0,40	0,45	1,14	0,25	0,51	0,68	0,41	0,39	
	Chuvosa	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	5,00	15,00	20,00	
Íon Nitrato (mg N L ⁻¹)	DP	-	-	-	-	-	0,21	0,19	0,30	
	Seca	1,03	1,17	1,06	0,37	0,30	1,26	<LQ	0,15	10
	DP	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,08	-	0,01	
	Chuvosa	0,73	0,21	0,31	0,05	0,09	0,55	<LQ	0,08	
Col. totais e termotolerantes (100 mL)	DP	0,05	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	-	0,01	
	Seca	+	+	+	+	-	-	+	-	-
Profundidade (m)	Chuvosa	-	+	+	+	-	-	+	+	
		113	112	128	130	152	176	70	656	

VMP – Valor Máximo Permitido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 [2]. LQ – Limite de quantificação. DP – Desvio Padrão

A cor é um parâmetro estético da qualidade da água, levando à aceitação ou rejeição pelo consumidor. A intensidade da cor varia de acordo com a dissolução de substâncias na água, que

na maioria dos casos, originam-se de matéria orgânica em decomposição e/ou pela presença de partículas inorgânicas, como ferro e manganês. Normalmente as águas subterrâneas não demonstram problemas com esse parâmetro, porém, em alguns casos específicos, elas podem apresentar um elevado teor de íons de ferro, como encontrado no presente estudo (Tabela 3), acarretando assim no aumento da coloração, quando em contato com o oxigênio [19].

Possível explicação para a diferença sazonal de fósforo total seria a diluição que aumenta no período chuvoso. O maior valor para esse parâmetro foi encontrado no poço mais raso (G), localizado nas proximidades de um frigorífico, provável infiltração de resíduos orgânicos contendo fósforo em sua composição química. Os maiores valores de fósforo nos poços B, D e E provavelmente estão relacionados com a percolação desse macronutriente para as águas subterrâneas devido as proximidades dos referidos poços com áreas agricultáveis (lavouras de milho, soja e cana-de-açúcar) que recebem anualmente quantidades expressivas de fertilizantes sintéticos contendo fósforo em suas formulações. Segundo Foppa et al. (2004) [20], o fósforo na água subterrânea é oriundo de ação antrópica, tanto por uso de produtos agroquímicos e detergentes, como por rejeitos domésticos resultantes do metabolismo humano. Estudos em outras regiões relacionam o aumento no teor de fósforo nas águas subterrâneas devido à infiltração de necrochorume, que em sua composição possui aproximadamente 60% de água, 30% de sais minerais e 10% de substâncias orgânicas, bem como pela percolação desse líquido tóxico no solo, pelo descarte inadequado dos resíduos sólidos [21].

De acordo com Rocha et al. (2009) [22], a alcalinidade refere-se à capacidade quantitativa da água de neutralizar um ácido forte até um determinado pH. No período de estiagem ocorre o rebaixamento do nível freático e em função disso o meio fica mais concentrado, elevando os valores de alcalinidade.

Todos os poços no período chuvoso e mais da metade deles (62,5%) no período seco apresentaram valores de DQO superiores ao VMP (3 mg L^{-1}). Esse resultado pode ser um indicativo de contaminação, tanto do solo quanto da água, na qual o meio apresenta um elevado teor de substâncias químicas susceptíveis à oxidação apenas por meio químico. Os elevados resultados de DQO nas amostras poderiam ser justificados levando em consideração os teores dos íons cloreto e nitrato, que são bons indicativos da presença de matéria orgânica. Porém, seria necessário um estudo mais aprofundado para explicar os resultados discrepantes desse parâmetro, já que os valores dos íons cloreto e nitrato encontrados foram abaixo do VMP e não apresentaram correlação significativa entre si, mas a presença desses íons é um bom indicativo de contaminação da água subterrânea por esgoto [8].

Os valores da DQO nos poços A, B, C e D no período de seca foram superiores aos do período chuvoso, isso se deve principalmente a diluição que ocorre no período chuvoso (recarga dos aquíferos). Entretanto, nos poços E, F, G e H, os valores da DQO na estação chuvosa foram superiores aos da estação seca, isso ocorre devido as significativas concentrações dos íons inorgânicos, ferro e manganês (Tabela 3), que em suas formas reduzidas são oxidados quantitativamente pelo dicromato, incremento nos valores da DQO [14].

Os menores valores do íon nitrato foram encontrados nos poços E, G e H, sendo o primeiro é o poço mais afastado da influência da área urbana e o último é o mais profundo, indicando que esse pode ser o valor de fundo (teor natural, pré-antrópico) das concentrações dos íons nitrato nas águas subterrâneas locais, e sugerindo que os outros valores sejam anômalos ao padrão por causa de algum tipo de contaminação antrópica. Apesar de valores do íon nitrato estarem abaixo do VPM, vale ressaltar que os maiores valores desse parâmetro foram encontrados nos poços A, B, C e F ($1,13 \text{ mg N L}^{-1}$, em média) que tendem a se localizar na zona mais central e densamente urbanizada da cidade. De acordo com Biguelini e Gumy (2012) [23], concentrações maiores que 10 mg L^{-1} de nitrato podem ser fatais para crianças com idade inferior a 6 meses, provocando a “Síndrome do bebê azul”, além de ser fator de risco para a formação de células cancerígenas. Considerando que cloreto e nitrato não são encontrados em rochas, esses parâmetros são os principais indicativos de contaminação em águas subterrâneas por efluentes domésticos em área urbana, tanto por vazamento na rede, fossas negras ou por lixões [4, 24].

Apesar de não apresentar diferença significativa, houve uma tendência de valores de condutividade elétrica da água também serem maiores no período seco. Isso se dá pelo fato de que nesse período os sais presentes na água se encontram mais concentrados, já que durante as

chuvas ocorre maior infiltração de água superficial, acarretando a diluição desses sais. Esse parâmetro em águas subterrâneas altera-se de acordo com as qualidades das rochas, podendo ser provenientes da dissolução do material rochoso [19].

Os valores de condutividade elétrica apresentaram alta correlação com a dureza total e cálcica da água ($r = 0,91$ e $0,96$, respectivamente). Provavelmente, a dureza da água está relacionada diretamente à quantidade de íons de cálcio e magnésio livres, os quais são provenientes da dissolução de veios milimétricos de calcita (CaCO_3) que ocorrem preenchendo as fraturas das rochas basálticas na região. Águas com elevados teores de dureza podem acarretar um sabor desagradável, bem como a incrustações nas torneiras [1].

3.2 Parâmetros microbiológicos

Todos os poços analisados apresentaram coliformes totais e termotolerantes em pelo menos uma estação, estando em desacordo com a Portaria GM/SM nº 888/2021 [2]. As exceções foram os poços E e F, que se localizavam em bairros mais afastados do centro urbano. Esses microrganismos estão presentes no ambiente e alguns caminhos podem levar à contaminação dos poços perfurados para captação de água: de forma natural devido a fraturas e falhas presentes no solo e nas rochas, e/ou por aberturas nas laterais dos poços devido à construção inadequada dos mesmos [4].

A presença desses microrganismos nos ambientes subterrâneos deve-se à falha ou até mesmo à inexistência de proteção dos recursos hídricos, que são em grande maioria a recarga das águas subterrâneas, através do uso inadequado de insumos, descarte incorreto de efluente e destruição da mata nativa em áreas de preservação permanente [1]. A infiltração do necrochorume também pode ser uma fonte de contaminação por conter bactérias, dentre elas a *Escherichia coli* [25].

3.3 Metais potencialmente tóxicos e análise de risco à saúde

Dentre os metais potencialmente tóxicos analisados, Fe, Cd, Pb, Ni, Mn e Cr estavam acima do VMP (Tabela 3). De acordo com [1], com exceção ao Fe, que pode estar presente nas rochas, a origem desses elementos na água subterrânea está relacionada a ações antrópicas, como lixões e aterros abandonados, despejos industriais, descarte inadequado de pilhas e baterias.

Forte correlação foi encontrada entre Fe com Ni, Zn, Cr e Cu ($r > 0,8$). Ressalta-se que as coletas foram realizadas por meio de torneiras, com isso os teores de Fe, juntamente com outros metais como Ni e Cr, que compõem a formação do aço, podem estar relacionados a incrustações e ferrugens nas tubulações de passagem da água [26].

A maior parte do Zn e do Cu depositada no ambiente, e conseqüente percolação nas águas subterrâneas, provêm de fontes antropogênicas, como as atividades de fundição, mineração, disposição inadequada de resíduos eletrônicos, produtos empregados como antiaderentes e fertilizantes [5].

Tabela 3: Concentração de metais potencialmente tóxicos na água dos poços analisados na área urbana de Uberaba-MG.

Metais (mg L ⁻¹) DP	Poços								VMP
	A	B	C	D	E	F	G	H	
Ferro	0,370	0,330	0,370	0,320	0,430	0,770	3,130	1,020	0,300
DP	0,006	0,005	0,002	0,001	0,018	0,084	0,016	0,051	
Chumbo	<LQ	0,094	0,095	<LQ	<LQ	0,071	0,105	0,223	0,010
DP	-	0,002	0,040	-	-	0,001	0,003	0,005	
Cádmio	0,170	0,201	0,040	<LQ	<LQ	<LQ	0,095	0,123	0,003
DP	0,005	0,008	0,001	-	-	-	0,002	0,004	
Níquel	0,005	0,121	0,011	<LQ	<LQ	0,021	0,135	0,023	0,070
DP	0,001	0,002	0,001	-	-	0,001	0,005	0,004	
Zinco	<LQ	0,131	0,051	0,022	<LQ	0,041	0,135	0,025	5,000
DP	-	0,005	0,003	0,001	-	0,001	0,002	0,001	
Manganês	0,171	0,121	0,171	0,122	0,213	0,271	0,315	0,223	0,100
DP	0,010	0,010	0,004	0,005	0,002	0,013	0,031	0,012	
Cromo	0,044	0,080	0,006	<LQ	<LQ	0,012	0,105	0,033	0,050
DP	0,001	0,001	0,001	-	-	0,001	0,005	0,004	
Cobre	<LQ	0,020	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	0,014	0,012	2,000
DP	-	0,001	-	-	-	-	0,001	0,001	
Mercúrio	<LQ	0,001							
DP	-	-	-	-	-	-	-	-	

VMP – Valor Máximo Permitido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 [2]. LQ – Limite de quantificação.
DP – Desvio Padrão

A análise de risco à saúde mostrou-se significativa ($HI > 1$) para os poços A e B, seguidos por H e G (Tabela 4). Cd foi o parâmetro com os maiores coeficientes de risco (HQ) contribuindo com mais de 90% do HI desses poços, seguido por Cr. Os efeitos tóxicos do Cd atingem todos os organismos de um ecossistema, especificamente os seres humanos, os quais quando expostos a concentrações letais, podem desenvolver diversos problemas de saúde como enfisema, anemia, disfunção hepática e renal, danos neurológicos e reprodutivos, câncer e outros [27].

O metal Cr na forma trivalente (Cr^{3+}) é essencial ao metabolismo humano e sua carência causa doenças. Enquanto a forma hexavalente (Cr^{6+}) é extremamente tóxica, cancerígena e sua ingestão mesmo em pequenas quantidades pode ser fatal ao organismo humano [28].

Tabela 4: Coeficiente de risco (HQ) e o Índice de risco à saúde (HI) devido à ingestão de água dos poços analisados contendo metais potencialmente tóxicos e nitrato.

Elemento	Poços/HQ							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Cádmio	1,18	1,38	0,28	0	0	0	0,66	0,85
Cobre	0	$2 \cdot 10^{-3}$	0	0	0	0	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$
Cromo	0,05	0,09	0,01	0	0	0,01	0,12	0,04
Manganês	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	0	0,01	0,01	0,01
Níquel	$9 \cdot 10^{-4}$	0,02	$2 \cdot 10^{-3}$	0	0	$4 \cdot 10^{-3}$	0,02	$4 \cdot 10^{-3}$
Zinco	0	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	$2 \cdot 10^{-3}$	0
Nitrato	0,01	0,01	0,01	$4 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	0,01	0	$1 \cdot 10^{-3}$
HI	1,24	1,52	0,30	0,01	$3 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,81	0,90

O dendrograma obtido pela análise de agrupamento corrobora os resultados encontrados para as análises físico-químicas e de risco à saúde, evidenciando a formação de três grupos (Figura 2). Um grupo é formado pelos poços A e B, que apresentaram os maiores riscos e estão localizados em um posto de combustível e no aeroporto, respectivamente. Nesses poços, o elevado teor de Cd provavelmente está relacionado com as atividades antrópicas, com destaque para a disposição ambientalmente inadequada dos resíduos sólidos nas proximidades dos poços tubulares tais como tintas, baterias, combustíveis e lubrificantes [1].

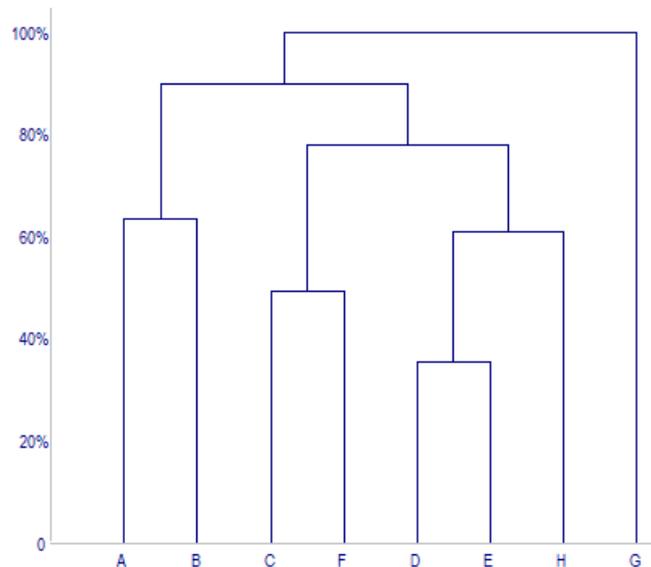


Figura 2: Dendrograma de similaridade com base nos parâmetros físico-químicos da água dos poços analisados na área urbana de Uberaba-MG.

Outro grupo é formado pelos poços D e E que são similares pelas baixas concentrações de metais potencialmente tóxicos e, conseqüentemente, apresentando os menores riscos à saúde. Esses pontos localizam-se em um bairro antigo, próximo ao centro (D) e na periferia, próximo a um cemitério (E). A proximidade de 650 m do cemitério não interferiu na qualidade da água. Provavelmente as características hidrogeológicas da área, a dinâmica natural do fluxo subterrâneo e a elevada profundidade do nível d'água junto com as atividades cemiteriais recentes evitaram, até o momento das análises, a contaminação das águas subterrâneas (poço E) pelo necrochorume.

Os poços G e H são o mais raso e o mais profundo, possuindo em torno de 70 e 656 m de profundidade, respectivamente, e apresentam características físico-químicas da água que diferem dos demais poços, os quais variam de 112 a 176 m de profundidade. O poço G apresentou maiores valores para os seguintes parâmetros: condutividade, cor, dureza cálcica, fósforo total, Fe, Ni, Zn, Mn, Cu e Cr. Vale ressaltar que a presença dos metais encontrados nesse poço pode apresentar riscos para o consumo humano, uma vez que os efeitos nocivos desses metais à saúde humana são relatados com frequência, sendo suas ações potencialmente perigosas ao sistema nervoso central e endócrino. Esses poluentes também contribuem para o aumento do risco de câncer e anormalidades reprodutivas após muitos anos de exposição como resultado de seu efeito cumulativo [29].

O poço H é o único que retira água do aquífero Guarani e diferiu dos demais poços por apresentar valores intermediários para os parâmetros da água analisados. Esperava-se que a qualidade da água desse poço fosse melhor, mas alguns parâmetros apresentaram-se em desacordo com a legislação: cor, DQO, Fe, Pb, Cd e Mn. As atividades antrópicas que ocorrem na área urbana tendem a introduzir, através do processo de infiltração, uma gama de elementos químicos na zona saturada, alterando a qualidade físico-química dos aquíferos subjacentes. O vazamento da rede de coleta de esgoto é um dos principais fatores de contaminação das águas subterrâneas em áreas urbanas, que tem como principal indicador o elemento nitrato [30].

Embora os valores encontrados de nitrato estejam muito abaixo do limite aceitável pela legislação brasileira ($< 10 \text{ mg.N L}^{-1}$), percebe-se que os maiores valores tendem a acontecer na porção mais densamente povoada da área urbana, em contraposição aos baixos valores localizados nas áreas periféricas (poços D e E) e no poço H que capta água do aquífero Guarani, que está isolado hidraulicamente das atividades antrópicas em superfície.

Tal constatação é um indicativo de que está havendo uma interação da rede de esgoto com as águas subterrâneas e que está alterando lentamente as concentrações naturais de nitrato (background) do aquífero.

4. CONCLUSÃO

Ao analisar os resultados obtidos no presente estudo, conclui-se que apesar de um parâmetro ou outro estar em divergência com a legislação vigente, a maioria dos resultados apresentaram-se dentro dos VMP segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021 [2]. Porém, seria de grande relevância realizar uma análise nas regiões menos ocupadas para averiguar os valores padrão de parâmetros de água subterrânea dos respectivos aquíferos analisados, pois os valores obtidos, principalmente de nitrato e cloreto, mesmo dentro dos padrões da legislação podem ser indicativos de contaminação dos aquíferos por esgoto.

A análise de risco à saúde mostrou-se em consonância com os resultados encontrados para as análises físico-químicas. O teor de Cd nas águas subterrâneas foi o parâmetro em destaque, contribuindo com mais de 90% do Índice de Risco (HI). Essas alterações precisam ser constantemente monitoradas com a finalidade de proteger a saúde da população e conhecer a real qualidade da água subterrânea para consumo. Assim, os resultados encontrados contribuem para o delineamento de estudos futuros, servindo como subsídio para gestores ambientais e de saúde pública.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil [Internet]. Brasília (DF): ANA; 2007. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/imprensa/publicacoes/Panorama_Qualidade_Aguas_Superficiais_BR_2012.pdf
2. Brasil. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 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 [Internet]. Brasília (DF): Diário Oficial da União; 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html
3. Garcia ENA, Moreno DAAC, Fernandes ALV. A importância da preservação e conservação das águas superficiais e subterrâneas: um panorama sobre a escassez da água no Brasil. Fórum Ambiental da Alta Paulista 2015;11(6):235-49. doi: 10.17271/1980082711620151259
4. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Poluição das águas subterrâneas. Governo do Estado de São Paulo [Internet]; [citado em 20 mai 2022]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/informacoes-basicas/poluicao-das-aguas-subterraneas/>
5. Menezes JPCD, Bertossi APA, Santos AR, Neves MA. Correlação entre uso da terra e qualidade da água subterrânea. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2014;19(2):173-86. doi: 10.1590/S1413-41522014000200008
6. Chotpantarat S, Parkchai T, Wisitthammassri W. Multivariate statistical analysis of hydrochemical data and stable isotopes of groundwater contaminated with nitrate at huay sai royal development study center and adjacent areas in Phetchaburi Province, Thailand. Water 2020;12:1127. doi: 10.3390/w12041127
7. Lima JES, Almeida CSC, Mourão MAA, organizadores. Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: Relatório diagnóstico Sistema Aquífero Bauru-Caiuá no Estado de Minas Gerais, Bacia Sedimentar do Paraná. 13. ed. Belo Horizonte (MG): CPRM; 2012.
8. Moura RS, Pelli A, Terra APS, Okura MH. Qualidade da água de minas em área urbana na cidade de Uberaba (MG). Revista Baiana de Saúde Pública 2009;33(2):231-42. doi: 10.22278/2318-2660.2009.v33.n2.a208
9. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cidades: Uberaba [Internet]; [citado em 30 mai 2022]. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/uberaba/panorama>

10. Batezelli A, Saad AR, Fulfaro VI, Corsi AC, Landim PMB, Perinotto JAJ. Análise de bacia aplicada às unidades mesozoicas do Triângulo Mineiro (Sudeste do Brasil): uma estratégia na prospecção de recursos hídricos subterrâneos. *Revista Águas Subterrâneas* 2005;19(1):61-73. doi: 10.14295/ras.v19i1.1352
11. Campos JCV, Gastmans D, Santarosa LV, Lopes IO, Alves MCP, Martins LFM, Fabian AJ. Estimativas da recarga do sistema aquífero Bauru em uma microbacia no entorno da cidade de Uberaba-MG. *Anuário do Instituto de Geociências*. 2021;44:40585. doi: 10.11137/1982-3908
12. Silva ICO, Campos JCV. Potencial hidrogeológico da cidade de Uberaba – MG. *Revista Águas Subterrâneas*. 2018;Suplemento:1-4.
13. Batezelli A, Saad AR, Fulfaro VJ, Corsi AC, Landim PMB, Perinotto JAJ. Análise de bacia aplicada às unidades mesozóicas do Triângulo Mineiro (sudeste do Brasil): uma estratégia na prospecção de recursos hídricos subterrâneos. *Águas Subterrâneas* 2005;19(1):61-73. doi: 10.14295/ras.v19i1.1352
14. Baird RB, Eaton AD, Rice EW, editors. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. Whashington (US): American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation; 2017.
15. United States Environmental Protection Agency (USEPA). *Recognition and management of pesticide poisonings* [Internet]. 6. ed. United States of America: EPA; 2013. Disponível em: <https://www.epa.gov/pesticide-worker-safety/recognition-and-management-pesticide-poisonings>
16. United States Environmental Protection Agency (USEPA). *Method 3510c. Separatory funnel liquid-liquid extraction*. Whashington (DC): USEPA; 1996.
17. Alves RLS, Sampaio CF, Nadal M, Schuhmacher M, Domingo JL, Segura-Muñoz SI. Metal concentrations in surface water and sediments from Pardo River, Brazil: Human health risks. *Environmental Research* 2014;133:149-55. doi: 10.1016/j.envres.2014.05.012
18. United States Environmental Protection Agency (USEPA). *Risk assessment guidance for superfund. Vol I: Human health evaluation manual*. Washington (DC): EPA; 1989.
19. Corcória JA, Celligoi A. Avaliação preliminar da qualidade da água subterrânea no município de Ibioporã-PR. *Revista de Estudos Ambientais* 2012;14(2):39-48. doi: 10.7867/1983-1501.2012v14n2p39-48
20. Foppa CC, Kuroshima KN, Medeiros RP, Borges SF, Barreiros MAB, Araújo SA, Scherer PF, Lacava L, Bonilha LEC. Avaliação da qualidade da água subterrânea e mobilização social: em busca da gestão participativa do uso da água (Praia de Taquaras, Balneário Camboriú/SC). *Revista Águas Subterrâneas*. 2004;Suplemento:1-15.
21. Kemerich PDC, Ucker FE, Foletto CV, Teixeira MC, Teixeira LC. Areas occupied by cemeteries and their impacts on water quality in the city of Santa Maria – Rio Grande do Sul (Brazil). *Ciência & Natura* 2012, 34(2):157-73. doi: 10.5902/2179460X9347
22. Rocha JC, Rosa AH, Cardoso AA. *Introdução à Química Ambiental*. 2. ed. Porto Alegre (RS): Bookman; 2009.
23. Biguelini CP, Gummy MP. Saúde ambiental: índices de em águas subterrâneas de poços profundos na região sudoeste do Paraná. *Faz Ciência* 2012;14(20):153-75. doi: 10.48075/rfc.v14i20.87242013
24. Faxina RRC, Calisto JS, Santos LF, Bertolino SM. Saneamento básico: uma perspectiva da gestão nas grandes cidades interioranas do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação*. 2018;3(2):115-30. doi: 10.18554/rbcti.v3i2.3310
25. Martins MT, Pellizari VH, Pacheco A, Myaki DM, Adams C, Bossolan NRS, Mendes JMB, Hassuda S. Qualidade bacteriológica das águas subterrâneas em cemitérios. *Revista de Saúde Pública*. 1991;25(1):47-52. doi: 10.1590/S0034-89101991000100010
26. Ficarís M, Moreira S. Análise de metais pesados em águas subterrâneas empregando a fluorescência de raios-x por reflexão total com radiação síncrotron (SR-TXRF). *Revista Águas Subterrâneas* 2004;18:1-17.
27. Fernandes LH, Mainier, FB. Risks of cadmium occupational exposure. *Revista Eletrônica Sistemas & Gestão*. 2014;9(2):194-9.
28. Magro CD, Deon MC, Thomé A, Piccin JS, Colla LM. Biossorção passiva de Cromo (IV) através da microalga *Spirulina platensis*. *Química Nova*. 2013;36(8):1139-45. doi: 10.1590/S0100-40422013000800011
29. Alpatova A, Verbych S, Bryk M, Nigmatullin R, Hilal N. Ultrafiltration of water containing natural organic matter: heavy metal removing in the hybrid complexation ultrafiltration process. *Separation and Purification Technology*. 2004;40:155-62. doi: 10.1016/j.seppur.2004.02.003
30. Lawrence AR, Macdonald DMJ, Howard AG, Barret MH, Pedley S, Ahmed KM. Guidelines for assessing the risk to groundwater from on-site sanitation. *British Geological Survey Report CR/01/142*. United Kingdom: BGS [Internet]; 2001. Disponível em: http://www.susana.org/_resources/documents/default/2-1926-agross-manual.pdf