



## Estudos de Caso e Notas

Alerta: Os artigos publicados nesta seção não são avaliados por pares e não são indexados. A intenção da seção ECNT é prover um espaço para divulgação de dados e estudos de interesse local, sem caráter científico. Sendo assim, a Revista Águas Subterrâneas não se responsabiliza pelo conteúdo publicado.

Disclaimer: Articles published in this section are not peer-reviewed and are not indexed. The intention of the ECNT section is to provide a space for the dissemination of data and studies of local interest, with no scientific character. Therefore, Revista Águas Subterrâneas is not responsible for this content.

# Geotecnologias aplicado à análise do risco à contaminação dos aquíferos da bacia hidrográfica do rio São Roque – SP

## Geotechnology applied to the analysis of the risk to the contamination of the aquifers in São Roque River watershed, São Paulo, Brazil

Phelipe da Silva Anjinho<sup>1</sup>, Letícia Geraldino Campos<sup>2</sup>, Frederico Fábio Mauad<sup>3</sup>, Luiz Eduardo Moschini<sup>4</sup> ✉

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.

<sup>2</sup> Gestora e Analista Ambiental, São Carlos, São Paulo.

<sup>3</sup> Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.

<sup>4</sup> Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo

✉ [phelipe.anjinho@usp.br](mailto:phelipe.anjinho@usp.br), [leticiageraldino@uol.com.br](mailto:leticiageraldino@uol.com.br), [mauadffm@sc.usp.br](mailto:mauadffm@sc.usp.br), [lemoschini@ufscar.br](mailto:lemoschini@ufscar.br)

### Resumo

#### Palavras-chave:

Aquíferos. Bacia hidrográfica. Contaminação. Vulnerabilidade.

Um dos principais problemas relacionados às ações antrópicas é a contaminação das águas subterrâneas, que pode ser intensificada em virtude das próprias características físicas dos aquíferos e do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica. Portanto, estudos que viabilizem um maior entendimento sobre a vulnerabilidade na qual os aquíferos estão sujeitos, relacionando-os as suas características naturais e antrópicas são essenciais para o gerenciamento das águas e a tomada de decisão. Em vista disso, o presente trabalho tem como objetivo analisar o risco de contaminação dos aquíferos da bacia hidrográfica do rio São Roque, utilizando a metodologia de análise multicritério. Para tal, foram gerados mapas temáticos do meio físico e de uso e cobertura do solo a fim de confeccionar o mapa final do risco à contaminação dos aquíferos da região. Em suma, as análises realizadas indicam situação crítica na que se refere à degradação dos aquíferos da bacia, com quase 70% da área classificada com risco alto e muito alto à contaminação das águas subterrâneas.

### Abstract

#### Keywords

Aquifers. Watershed. Contamination. Vulnerability.

One of the main problems related to anthropic actions is the contamination of groundwater, which can be intensified due to the physical characteristics of the aquifers and the land use of the watershed. Therefore, studies that make possible a greater understanding about the vulnerability in which the aquifers are subject, relating them to their natural and anthropic characteristics are essential for water management and decision making. The objective of this study was analyze the risk to the contamination of the aquifers of the São Roque river watershed, using the multicriteria analysis methodology. For this purpose, thematic maps of the physical environment and land use and coverage were generated in order to prepare the final map of the potential contamination of the region's aquifers. In summary, the results indicate a critical situation regarding the degradation of the watershed aquifers, with almost 70% of the area classified as high risk and very high to the contamination of groundwater.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v3i2i3.29136>

## 1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam 95% de toda a água doce disponível para consumo no planeta (CAPUCCI et al., 2001). Os reservatórios subterrâneos são formados por camadas rochosas ou formações geológicas, suficientemente permeáveis, capazes de armazenar e transmitir água em quantidades que possam ser aproveitadas como fontes de abastecimento para usos múltiplos (IRITANI; EZAKI, 2012). Seu sistema de recarga provém das chuvas que, através dos processos de infiltração e percolação, permitem que a água chegue até as camadas mais profundas do solo.

Atualmente, os aquíferos se encontram em um cenário de grande susceptibilidade à contaminação. Com a pressão antrópica sobre as águas, juntamente com os usos dos solos cada vez mais exacerbado, regados a agrotóxicos e outros insumos poluidores, a qualidade da água que chega ao subsolo torna-se comprometida, impactando direta e negativamente os recursos hídricos subterrâneos (FOSTER; HIRATA, 1991; HIRATA, 1994; RIBEIRO et al., 2007).

A integração entre vulnerabilidade natural e cargas poluidoras caracteriza o potencial de poluição de um sistema aquífero. Sendo assim, o risco à poluição depende, não apenas das características que demonstram a vulnerabilidade de um aquífero, mas também das atividades antrópicas que geram as cargas poluidoras que podem entrar nos ambientes subterrâneos (FERREIRA, 1998).

Considerando que o risco à contaminação é consequência de costumes já intrínsecos às populações humanas, e que para se reabilitar um aquífero que já esteja com má qualidade são necessários altos investimentos, nota-se a necessidade de análises holísticas que integrem o conhecimento técnico sobre as unidades aquíferas com as formas de usos e ocupação do solo que as recobre, na tentativa de identificar, antecipadamente, possíveis adversidades que possam alterar a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos (FOSTER; HIRATA, 1988).

A relação entre as diversas informações ambientais e as atividades econômicas desenvolvidas em uma determinada região é essencial para projetos de gerenciamento da qualidade das águas subterrâneas. Uma tecnologia potencial para ser aplicada em análises holísticas como as necessárias ao estudo da vulnerabilidade e risco à contaminação de aquíferos refere-se aos sistemas de informação geográfica. Tais ferramentas possibilitam visualizar e analisar dados espaciais, sendo possível identificar as fontes de contaminação e, dessa forma, apontar áreas prioritárias à conservação das águas subterrâneas, demonstrando ser uma ferramenta útil aos envolvidos na gestão e tomada de decisão (CANTER; CHOWDHURY; VIEUXT, 1994).

Em pesquisa na literatura foram encontrados alguns trabalhos pertinentes à temática poluição de aquíferos (ALLER et al., 1987; COSTA et al., 2015; DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1997; FERREIRA, 1998; FOSTER; HIRATA, 1988; HIRATA, 1994; RUSSO, 2009; SANTOS; MANOEL; NASCIMENTO, 2010; URICCHIO; GIORDANO; LOPEZ, 2004). Tais trabalhos tiveram como principal objetivo identificar as áreas de maior vulnerabilidade e risco à contaminação das águas subterrâneas, demonstrando, dessa forma, ser uma ferramenta importante na prevenção dos impactos sobre a qualidade dos aquíferos.

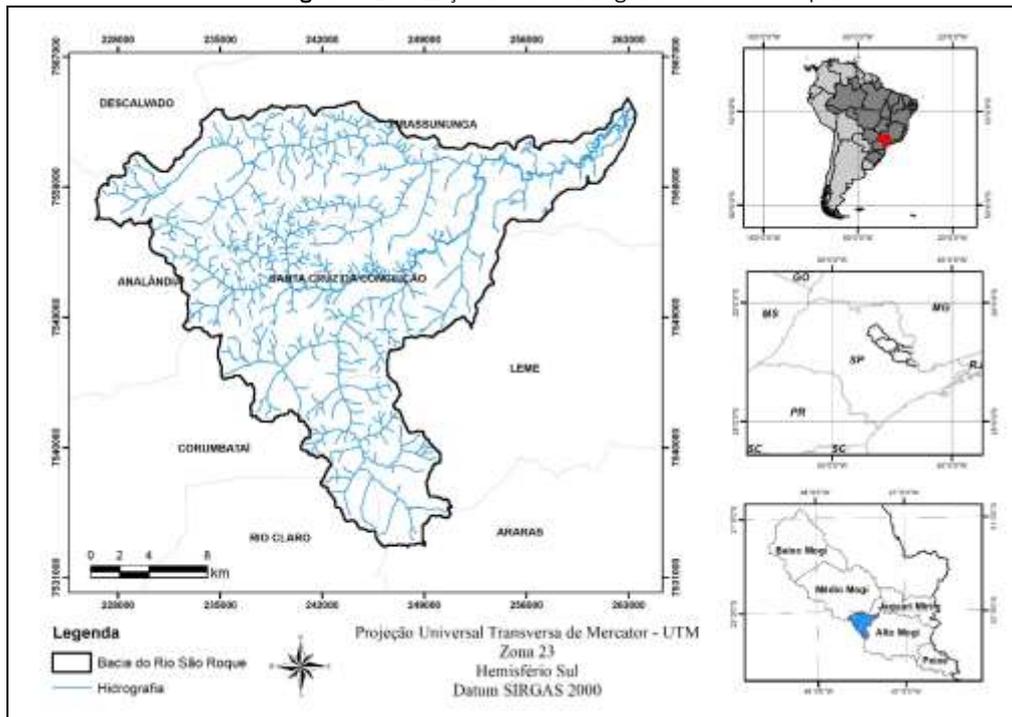
Existem diversas metodologias relacionadas com a análise da vulnerabilidade e risco à contaminação de aquíferos, GOD (FOSTER, 1987; FOSTER; HIRATA, 1988), DRASTIC (ALLER et al., 1987), SINTACS (CIVITA, 1994), EPIK (DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1997). Nesse estudo, optou-se por utilizar o método de análise multicritério, determinado por Costa et al. (2015), com o propósito de analisar as possíveis interações entre as características naturais do terreno e as atividades antrópicas, a fim de propor diretrizes à restrição e adequação das atividades humanas potencialmente poluidoras das águas subterrâneas de acordo com a capacidade de suporte do meio ambiente.

Diante desse contexto e tendo em vista a importância da bacia hidrográfica do rio São Roque como fonte de abastecimento de municípios interioranos do Estado de São Paulo, este trabalho tem como objetivo avaliar o risco à contaminação dos aquíferos da bacia hidrográfica do rio São Roque por meio de ferramentas de geoprocessamento. A análise consistiu na confecção de mapas temáticos relacionados às características físicas, juntamente com o uso e cobertura da terra, fornecendo assim um instrumento de planejamento e gestão dos recursos hídricos associados.

## **2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A bacia hidrográfica do Rio São Roque (BHRSR) está localizada na região nordeste do Estado de São Paulo, entre os paralelos 22° 17' 28,402" S e 22° 0' 21,771" S e meridianos 47° 17' 44,883" W e 47° 38' 57,481" W. Ocupa uma área de 495,15 km<sup>2</sup> e está inserida na Unidade de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (UGRHI 09) do Rio Mogi Guaçu (Figura 1).

Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do rio São Roque.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O rio São Roque é um dos principais mananciais de abastecimento regional da UGRHI 09 (CBH – MOGI, 2016). Suas águas nascem no município de Santa Cruz da Conceição, em uma altitude de aproximadamente 630 m, percorrendo 47,31 km de extensão, desaguando no rio Mogi Guaçu no município de Leme.

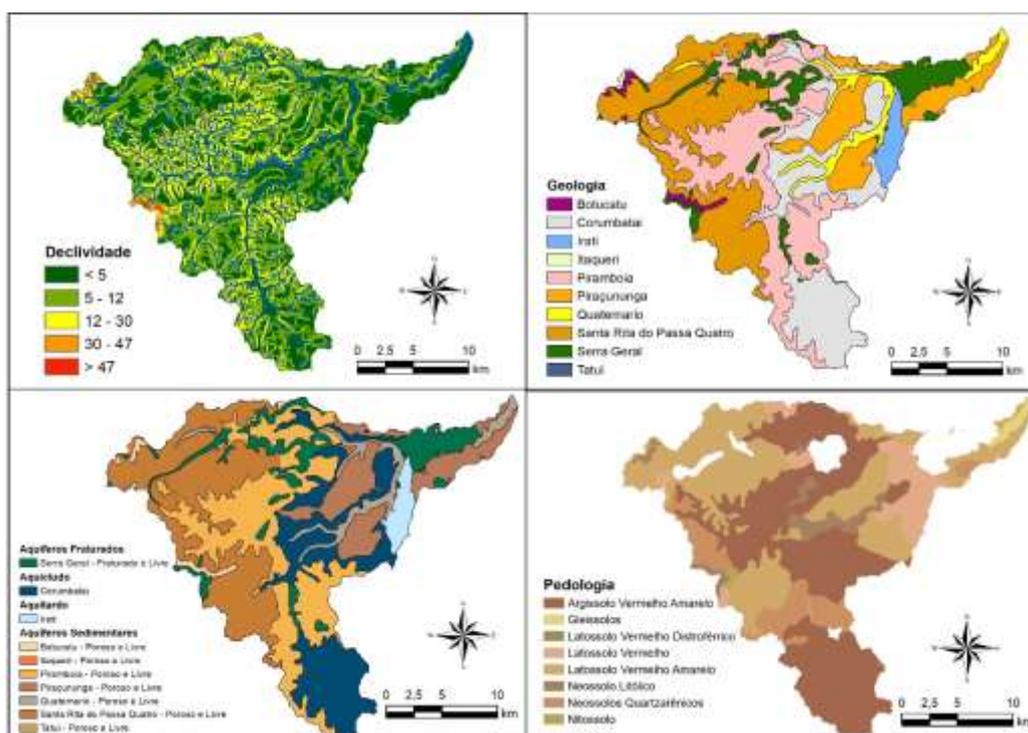
Segundo a Classificação de Köppen, a BHRSR apresenta tipo climático Cwa que compreende toda a parte central do Estado de São Paulo e é caracterizado pelo clima tropical de altitude, com chuvas no verão e seca no inverno, com a temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C (CEPAGRI, 2017).

Geologicamente a BHRSR situa-se na Bacia Sedimentar do Paraná (Figura 2) e tem como características geológicas os arenitos da Formação Botucatu, folhelhos variados da Formação Corumbataí, Eruptivas Básicas, folhelhos carbonosos e calcários da Formação Irati, depósitos areno-conglomeráticos da Formação Itaqueri, arenitos fluviais da Formação Pirambóia, arenito da Formação Pirassununga, depósitos terciários arenosos da Formação Santa Rita do Passa Quatro, intrusivas básicas da Formação Serra Geral, siltitos arenosos da Formação Tatuí e depósitos recentes do Quaternário (SÃO PAULO - IG, 1986).

A caracterização pedológica da bacia é bastante diversificada (Figura 2), apresenta oito tipos de solos: Neossolos Quartzarênicos, Latossolo Vermelho Distroférico, Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho, Argissolo Vermelho Amarelo, Gleissolos, Neossolo Litólico e Nitossolo (SÃO PAULO - IAC, 1981).

A BHRSR tem sua formação Hidrogeológica (Figura 2) composta por sete Aquíferos Sedimentares (Botucatu, Itaqueri, Piraçununga, Pirambóia, Quaternário, Santa Rita do Passa Quatro e Tatuí), todos com características porosas e livres, um Aquífero Fraturado (Serra Geral), com característica fraturada e livre, um Aquícludo (Corumbataí) e um Aquitardo (Irati) (SÃO PAULO - IG, 1986).

Figura 2 - Caracterização física da BHRSR.



Fonte: Elaborado pelos autores

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

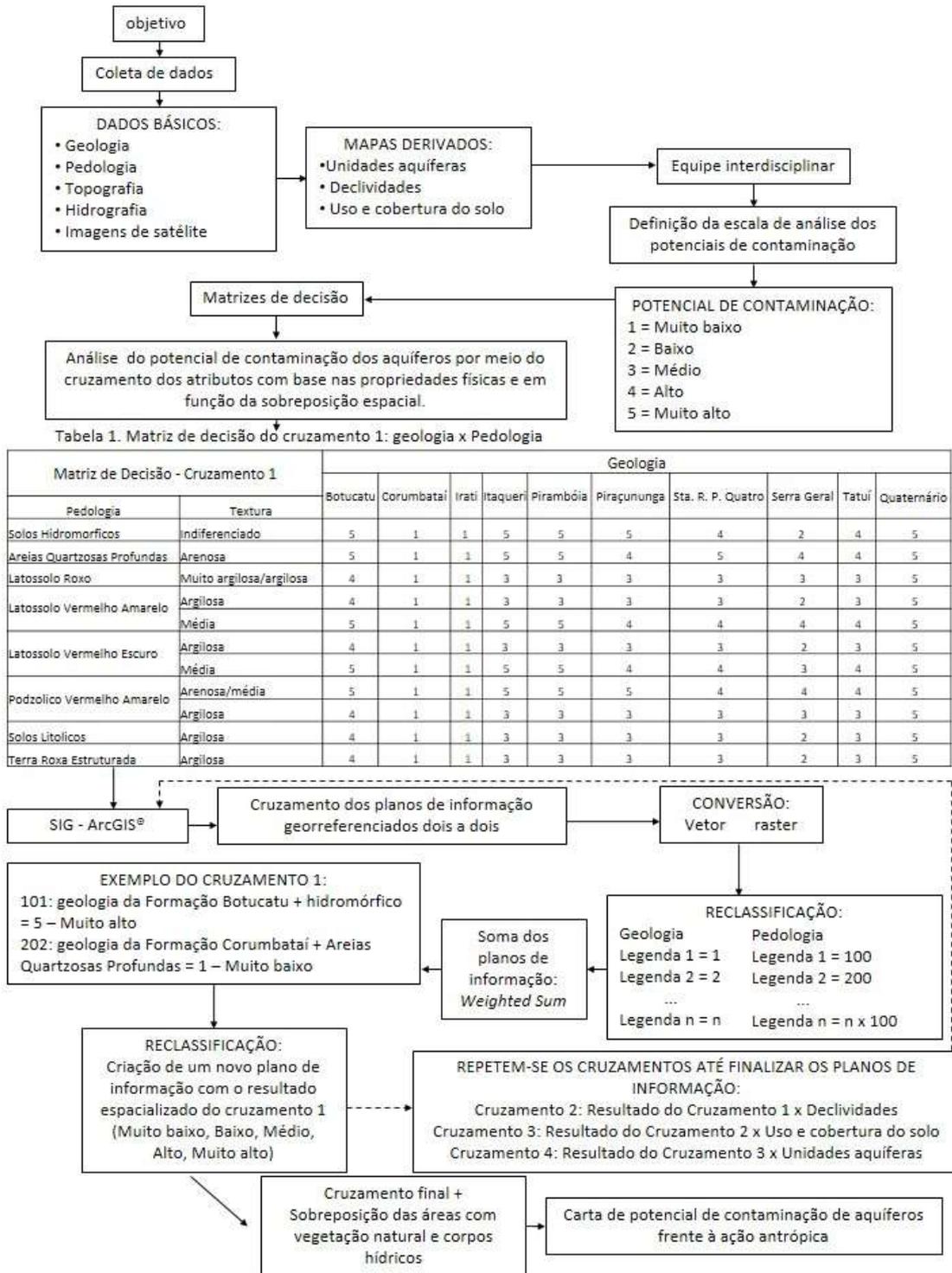
Para a montagem do banco de dados foram utilizadas as cartas topográficas dos municípios de Araras (SF-23-Y-A-II-3), Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2), Leme (SF-23-Y-A-II-1) e Rio Claro (SF-23-M-I-4) (BRASIL - IBGE, 1971), juntamente com as cartas pedológicas das quadrículas de Araras (SF-23-Y-A-II) e São Carlos (SF-23-Y-A-1) (SÃO PAULO - IAC, 1981), e as cartas geológicas de Araras (SF.23-M-II-3), Corumbataí (SF.23-Y-A-I-2), Leme (SF-23-Y-A-II-1) e Rio Claro (SF-23-M-I-4) do Instituto Geológico (SÃO PAULO - IG, 1986). Todas as cartas foram adquiridas na escala 1: 50.000. Utilizou-se também imagens de satélite do próprio software ArcGIS® 10.2 (ESRI World Imagery, Digital Globe, 7-27-2010).

A partir das cartas supracitadas e da imagem de satélite foram geradas as seguintes informações: mapa de declividade; mapa geológico; mapa pedológico; mapa de aquíferos; e mapa de uso e ocupação do solo, gerado a partir da digitalização manual em ambiente SIG. Para tanto, adotou-se o sistema geodésico de referência SIRGAS 2000, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e zona 23 sul.

Para a estimativa do risco à contaminação dos aquíferos da bacia do rio São Roque, utilizou-se o método de análise multicritério baseado em matrizes de decisão e avaliação dos critérios por equipe multidisciplinar. A análise multicritério consistiu na ponderação e cruzamento das informações do meio físico e uso e ocupação do solo em função do seu potencial de contaminação em ambiente SIG.

Foram realizados cruzamentos pareados, sendo o primeiro cruzamento composto pelo substrato geológico com a pedologia, em seguida o resultado do cruzamento 1 (geologia x pedologia) com a declividade e assim por diante, conforme demonstrado na Figura 3. Nas análises realizadas, as áreas dos corpos d'água foram excluídas, uma vez que o objetivo desse trabalho é avaliar o risco à contaminação dos aquíferos em função das características antrópicas e físicas da bacia, sendo que as possíveis interações entre rios e aquíferos não foram consideradas na metodologia desse trabalho.

Figura 3 - Fluxograma do processo de análise multicritério.



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tabelas de 1 a 3 apresentam a ponderação dos cruzamentos dos planos de informações utilizados na análise. A partir da metodologia utilizada foi possível identificar cinco níveis de contribuição à contaminação dos aquíferos: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto.

**Tabela 1** - Matriz de decisão do cruzamento 2 – resultado 1 x declividade.

Cruzamento 2		Declividade				
		0 – 5%	5 – 12%	12 – 30%	30 – 47%	> 47%
Resultado 1	Muito Baixo – 1	1	1	1	1	1
	Baixo – 2	3	3	2	1	1
	Médio – 3	4	4	3	3	2
	Alto – 4	5	5	4	3	3
	Muito Alto – 5	5	5	4	3	3

**Tabela 2** - Matriz de decisão do cruzamento 3 – resultado 2 x uso e cobertura do solo.

Cruzamento 3		Uso e cobertura do solo								
		Rural	Urbana	Cana de açúcar	Citricultura	Mineração	Pastagem	Vegetação nativa	Silvicultura	Solo Exposto
Resultado 2	Muito Baixo – 1	2	3	3	4	5	2	1	2	3
	Baixo – 2	3	4	4	5	5	3	2	3	5
	Médio – 3	4	5	5	5	5	4	3	3	5
	Alto – 4	5	5	5	5	5	5	4	4	5
	Muito Alto – 5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

**Tabela 3** - Matriz de decisão do cruzamento 4 – resultado 3 x unidades aquíferas.

Cruzamento 4		Unidades aquíferas									
		*Sed. Botucatu	*Aqc. Co- rumbataí	*Aqt. Irati	Sed. Itaqueri	Sed. Pirambóia	Sed. Pirassununga	Sed. Quaternário	Sed. Sta. RP Quatro	*Frat. Serra Geral	Sed. Tatuí
Resultado 3	Muito Baixo – 1	4	1	1	2	3	2	4	3	1	2
	Baixo – 2	4	1	1	2	4	3	4	4	1	3
	Médio – 3	5	1	1	3	4	3	5	4	2	3
	Alto – 4	5	1	1	4	5	4	5	5	3	4
	Muito Alto – 5	5	1	1	5	5	5	5	5	3	5

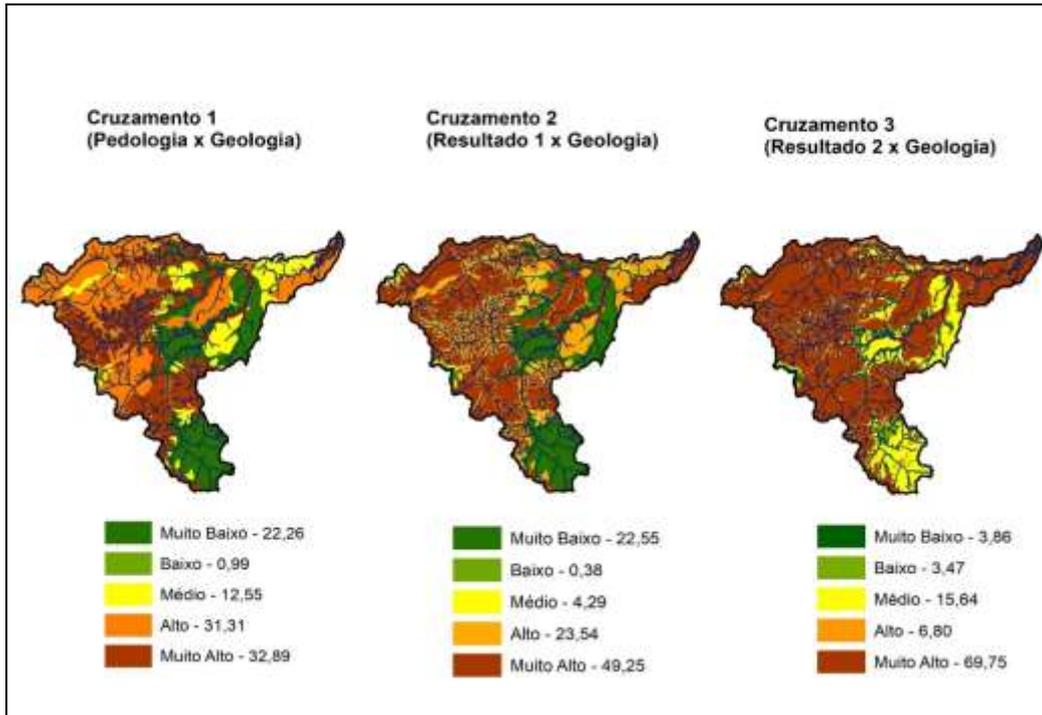
\* Sed: sedimentar; Aqc: aquífero; Aqt: aquífero; Frat: fraturado.

Com o objetivo de facilitar o entendimento da metodologia e das análises aqui realizadas, em um primeiro momento são apresentados os resultados dos dois primeiros cruzamentos que demonstram a vulnerabilidade natural dos aquíferos e em seguida são apresentados os dois últimos cruzamentos que compreendem, de fato, o risco do aquífero à contaminação por influência antrópica. Em suma, os dois primeiros cruzamentos demonstram que mais da metade da área da bacia se encontra nas classes alto e muito alto grau de vulnerabilidade à contaminação.

No primeiro cruzamento (geologia x pedologia), destacam-se as classes muito alto e alto com 64,2% da área de estudo (Figura 4). Tal situação pode ser explicada pelas características geológicas e pedológicas da região, com predomínio de substratos sedimentares e solos com textura arenosa que potencialmente podem favorecer a infiltração e a percolação de poluentes às águas subterrâneas.

No segundo cruzamento, observa-se um aumento das áreas com vulnerabilidade de contaminação muito alto, em virtude das baixas declividades da região que, em suma, são relativamente planas, o que favorece a infiltração da água contaminada nas camadas mais profundas do solo até chegar aos aquíferos da bacia.

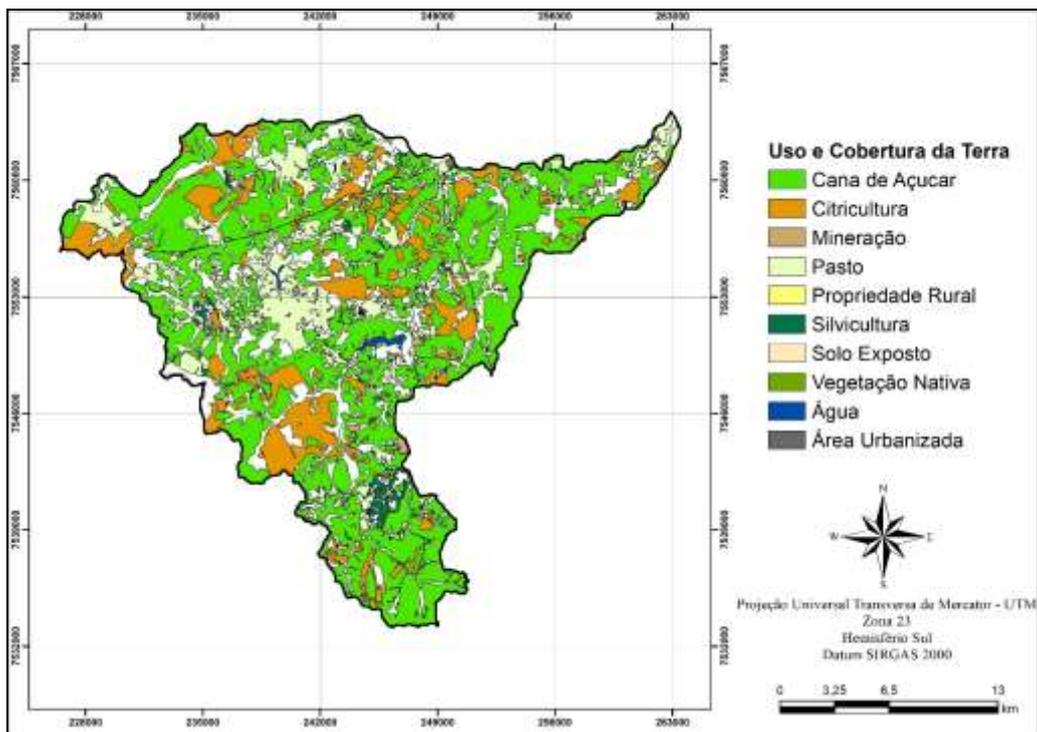
**Figura 4** - Cruzamentos intermediário da análise do risco de contaminação dos aquíferos da BHRSR.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O uso e cobertura do solo associado aos demais atributos físicos são fundamentais para o entendimento do risco à contaminação das unidades aquíferas. No que concerne ao uso do solo, foram identificadas dez categorias na área de estudo conforme apresentado na Figura 5. Pelo fato do uso e cobertura do solo ser o atributo que, potencialmente, proporciona a degradação das águas, os resultados do risco à contaminação serão apresentados em função dos mesmos.

**Figura 5** - Uso e cobertura do solo da BHRSR.



Fonte: Elaborado pelos autores.

As áreas urbanizadas ocupam 0,75% da área de estudo. O município de Santa Cruz da Conceição se encontra totalmente inserido na bacia, localizado sobre o Aquicludo Corumbataí, conferindo baixo risco à contaminação. O município de Pirassununga está parcialmente contido na bacia, ocupa as margens da região norte e se localiza sobre as áreas de alta vulnerabilidade, com ocorrência de Latossolos Vermelho Amarelo de textura média e substratos sedimentares.

As monoculturas de cana de açúcar são responsáveis pela ocupação de quase metade do território da BHRSR (49,27%). Está presente em todas as localidades, principalmente em regiões de baixa declividade, por facilitar a agricultura mecanizada. Tem maior influência em aquíferos porosos e livres, como é o caso dos aquíferos, Botucatu, Itaqueri, Piraçununga, Piramboia, Quaternário, Santa Rita do Passa Quatro e Tatuí. Dado que esse tipo de cultura proporciona impactos significativos sobre os recursos hídricos, devido à quantidade expressiva de agrotóxicos, fertilizantes, e outros insumos agrícolas utilizados (BAULD, 1996; LOPES SOARES; PORTO, 2007; MAHVI et al., 2005), além da degradação por influência de seus resíduos, especialmente a vinhaça (LOURENCETTI; MARCHI; RIBEIRO, 2012; DA SILVA; GRIEBELER; BORGES, 2007), pode-se observar que essa classe é uma das responsáveis por caracterizar a bacia com alto risco à contaminação.

As culturas de citros representam a segunda maior cultura agrícola da bacia, ocupando 14,25% da área, distribuída em pequenos e médios fragmentos ao longo da área de estudo. Caracterizam-se como uma das principais fontes de contaminação das águas devido ao uso intensivo de agrotóxicos e fertilizantes, substâncias essas imprescindíveis para garantir o sucesso da produção, visto que as monoculturas de citros estão sob constante ameaça de pragas, doenças e outros estressores ambientais (DABROWSKI et al., 2009; GONG et al., 2010; MARQUES et al., 2007). Ocorrem especialmente em áreas de alto risco à contaminação, acima de solos com textura arenosa (Neossolos Quartzarênicos e Latossolos Vermelho Amarelo) e aquíferos sedimentares das formações Santa Rita do Passa Quatro e Piramboia.

As atividades de mineração apresentam ocorrência em 0,32% do território. Estas são consideradas de alto impacto ambiental (MECHI; SANCHES, 2010) se não manejadas de forma correta, podendo atingir aquíferos livres e causar a sua contaminação. Sua maior ocorrência é sobre áreas de alto risco à contaminação, em solos arenosos e aquíferos sedimentares.

Os Pastos estão presentes, em sua maioria, na região central da bacia e ao norte, ocupando 14,15% da área situados em regiões de alto risco à contaminação, sobre os solos Argissolos Vermelho Amarelo de textura arenosa e sobre os aquíferos da formação Piramboia.

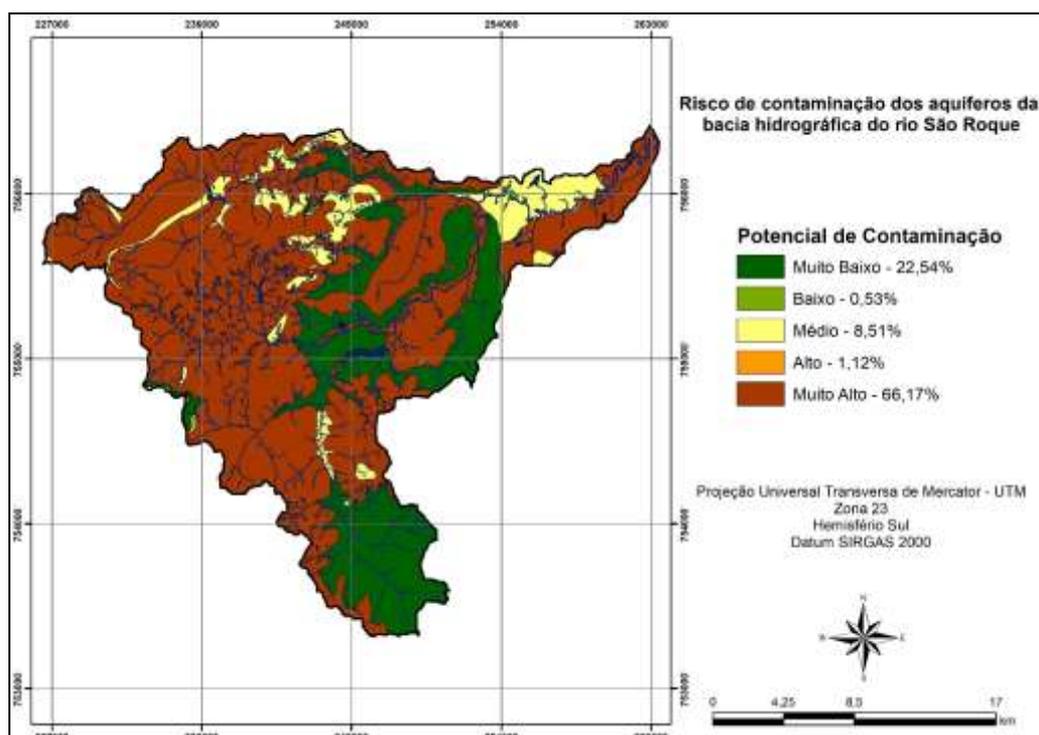
As propriedades rurais ocupam 0,91% da área de estudo, seus maiores impactos são advindos dos poços para abastecimento de água e fossas negras que se manejados incorretamente podem contaminar as águas subterrâneas. Essas áreas situam-se, principalmente, em áreas de baixo risco à contaminação.

As áreas de silvicultura estão mais presentes na região sul da bacia, ocupam 1,02% do território e situam-se em regiões de muito baixo risco à contaminação, sobre os Aquicludos da formação Corumbataí.

A vegetação nativa é recorrente em toda a extensão da bacia, principalmente em áreas próximas aos corpos hídricos (Áreas de Preservação Permanente), não oferece riscos à contaminação de aquíferos e compreende uma área de 17,97%.

De modo geral, os resultados demonstram que mais da metade da área da bacia apresenta situações críticas no que se refere ao risco de poluição das águas subterrâneas, com quase 70% da região enquadrada nas piores classes (alto e muito alto), conforme exibe a Figura 6 e a Tabela 4. Vale a pena ressaltar que as áreas de menor risco à contaminação são as regiões de menor vulnerabilidade, com predomínio de Aquicludos das formações Corumbataí e solos de textura argilosa como os Argissolos Vermelho Amarelo e os Latossolos Vermelho.

Figura 6 - Risco de contaminação dos aquíferos BHSR.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 4- Risco à contaminação dos aquíferos em função do uso e ocupação do solo.

Uso do solo	Risco à contaminação (km <sup>2</sup> )									
	Muito alto	(%)	Alto	(%)	Médio	(%)	Baixo	(%)	Muito baixo	(%)
Área urbana	1,81	0,37	-	-	0,07	0,01	-	-	1,83	0,37
Cana de açúcar	154,55	31,19	0,1	0,02	22,9	4,62	0,06	0,01	66,54	13,43
Citricultura	59	11,91	0,03	0,01	4,82	0,97	0,01	0,00	6,75	1,36
Mineração	1,45	0,29	-	-	-	-	-	-	0,12	0,02
Pasto	49,86	10,06	0,25	0,05	6,83	1,38	0,49	0,10	12,66	2,55
Propriedades rurais	2,82	0,57	0,07	0,01	0,49	0,10	-	-	1,13	0,23
Silvicultura	2,08	0,42	0,29	0,06	0,14	0,03	0,07	0,01	2,49	0,50
Solo exposto	0,92	0,19	-	-	0,05	0,01	-	-	0,22	0,04
Vegetação nativa	55,36	11,17	4,81	0,97	6,89	1,39	1,99	0,40	19,97	4,03
<b>Total</b>	<b>327,85</b>	<b>66,17</b>	<b>5,5</b>	<b>1,12</b>	<b>42,19</b>	<b>8,51</b>	<b>2,62</b>	<b>0,53</b>	<b>111,71</b>	<b>22,54</b>

Áreas não consideradas (água) = 4,69 km<sup>2</sup>

Área total da bacia = 495,516 km<sup>2</sup>

## 5. CONCLUSÕES

A partir da metodologia utilizada e dos resultados obtidos, foi possível prever os locais onde há maior potencial de contaminação dos aquíferos existentes sob a bacia do rio São Roque. De maneira geral, tais aquíferos encontram-se em situações agravante, onde 66,17% do território da bacia se situa em áreas com risco de contaminação muito alto. Este fato pode ser explicado pela própria vulnerabilidade natural intrínseca à bacia, que apresenta solos arenosos de alta porosidade, facilitando o fluxo vertical da água para o subsolo. As baixas

declividades, juntamente com as ocorrências de formações geológicas de origem sedimentar, também representam um fator determinante para tal resultado.

Além das características naturais, o fator antrópico também foi considerado no cruzamento da metodologia utilizada, no sentido do uso e ocupação do solo de forma negligenciada. Nota-se que as práticas agrícolas são as responsáveis pelo elevado risco à contaminação dos aquíferos. O cultivo de cana-de-açúcar é o uso predominante em toda extensão da bacia. Este uso corresponde por aproximadamente 32% da área classificada com risco muito alto à contaminação.

Por outro lado, têm-se áreas classificadas com risco de contaminação muito alto mesmo sendo ocupadas por vegetação nativa. Nestes casos, a vulnerabilidade natural dos aquíferos é a determinante, visto que é improvável que haja contaminação dos mesmos estando recobertos por tal uso. Sendo assim, planejar que áreas com inerente vulnerabilidade sejam ocupadas por vegetação nativa ou por atividades agrícolas com práticas de manejo de solo adequadas é um modo para se preservar os mananciais subterrâneos.

As análises aqui apresentadas fornecem alternativas para conciliar o uso do solo com a preservação do meio ambiente, servindo como um instrumento de planejamento e gestão ambiental, bem como modelo para a aplicação dessa metodologia em outras bacias hidrográficas.

## REFERÊNCIAS

- ALLER, L.; LEHR, J.H.; PETTY, R.; BENNETT, T. Drastic: a standardized system to evaluate groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. National Water Well Association, Worthington, Ohio, United States of America, 1987.
- AUGE, M. Vulnerabilidad de acuíferos. Revista Latino-Americana de Hidrogeología, n. 4, p. 85-103.
- BAULD, J. Groundwater Quality: Human Impact on a Hidden Resource. Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers, p. 143, 1996.
- BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cartas topográficas. Folhas topográficas de Araras (SF-23-Y-A-II-3), Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2), Leme (SF-23-Y-A-II-1) e Rio Claro (SF-23-M-I-4). Escala 1:50.000, 1971.
- CAPUCCI, E.; MARTINS, A.; M., MANSUR, K. L.; MONSORES, A. L. M. Poços tubulares e outras captações de águas subterrâneas: orientação aos usuários. Rio de Janeiro: SEMADS, 2001.
- CANTER, L. W., CHOWDHURY, A. K. M. M., VIEUX, B. E. Geographic information systems: A tool for strategic ground water quality management. Journal of Environmental Planning and Management, v. 37, n. 3, p. 251-266, 1994.
- CBH-MOGI. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu. Relatório de Situação dos Recursos Hídricos, ano base 2016, São João da Boa Vista, 2016.
- CEPAGRI. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura, 2017.
- CIVITA, M. La carte della vulnerabilità deli aquíferi all'inquinamento: teoria e pratica. Bologna: Pitagora Editrice, 1994, 325p.
- COSTA, C. W.; MORAES, M. C. P. D.; CANÇADO, C. J.; GUERRERO, J. V. R.; MARANGON, F.; LORANDI, R.; LOLLO, J. A. D.; MOSQUINI, L. E. Potencial de Contaminação de Aquíferos por Atividades Antrópicas da Bacia do Ribeirão do Meio – Município de Leme – SP. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 1, p. 218-225, 2015.
- DA SILVA, M. A.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.
- DABROWSKI, J. M.; MURRAY, K.; ASHTON, P. J.; LEANER, J. J. Agricultural impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions. Ecological Economics, v. 68, n. 4, p. 1074-1082, 2009.
- DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: International symposium and field seminar on "karst waters and environmental impacts", edited by: Günay, G. and Jonshon, Al, Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, Anais, 1997.
- FERREIRA, J. Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e proteção dos aquíferos de Portugal. In: IV Congresso da Água. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, Lisboa, Anais, 1998.
- FOSTER, S. Contaminação de las águas subterrneas. Lima, Peru: Organización Mundial de la Salud, 1987.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. Groundwater pollution risk assessment. A methodology using available data. Pan Ame. Cent. for Sanit. Engin. and Envir. Sci-en.(cepis). Lima, 1988.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterrneas: una metodología basada en datos existentes. In: Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterrneas: una metodología basada en datos existentes. OPS, 1991.

- GONG, L.-G.; XI, Y.-G.; LIU, M.-Q.; XU, X.; LI, D.-B. Input of Fertilizers and Pesticides in Citrus Orchards in Headwater Area of Dongjiang River and Its Potential Environmental Impact. *Journal of Ecology and Rural Environment*, v. 26, n. SUPPL. 1, p. 64–67, 2010.
- HIRATA, R. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas, 1994. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
- IRITANI, M. A.; EZAKI, S. As águas subterrâneas do Estado de São Paulo. In: *Cadernos de Educação Ambiental*. São Paulo (Estado). Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2012.
- LOPES SOARES, W.; PORTO, M. F. Atividade agrícola e externalidade ambiental: uma análise a partir do uso de agrotóxicos no cerrado brasileiro. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 12, n. 1, 2007.
- LOURENCETTI, C.; MARCHI, M. R. D.; RIBEIRO, M. L. Influence of sugar cane vinasse on the sorption and degradation of herbicides in soil under controlled conditions. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, v. 47, n. 10, p. 949–958, 1 nov. 2012.
- MAHVI, A. H.; NOURI, J.; BABAEI, A. A.; NABIZADEH, R. Agricultural Activities Impact on Groundwater Nitrate Pollution. *International Journal of Environmental Science & Technology*, v. 2, n. 1, p. 41–47, 1 mar. 2005.
- MARQUES, M. N.; COTRIM, M. B.; PIRES, M. A. F.; BELTRAME FILHO, O. Avaliação do impacto da agricultura em áreas de proteção ambiental, pertencentes à bacia hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape, São Paulo. *Química Nova*, v. 30, n. 5, p. 1171–1178, 2007.
- MECHI, A.; SANCHES, D. L. Impactos ambientais da mineração no Estado de São Paulo. *Estudos Avançados*, v. 24, n. 68, p. 209–220, 2010.
- RIBEIRO, M. L.; LOURENCETTI, C.; PEREIRA, S. Y.; MARCHI, M. R. R. de; OTHERS. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. *Química Nova*, 2007.
- RUSSO, A. de S. Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informação geográfica e geoestatística-UGRHI-PCJ. 2009. Universidade de São Paulo, 2009.
- SÃO PAULO. Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). Folhas pedológicas da quadrícula de Araras (SF-23-Y-A-II-3) e São Carlos (SF-23-Y-A-II), 1981.
- SÃO PAULO. Instituto Geológico (IG). Folhas geológicas de Araras (SF-23-M-II-3), Corumbataí (SF-23-Y-A-I-2), Leme (SF-23-Y-A-II-1) e Rio Claro (SF-23-M-I-4), 1986.
- SANTOS, R. A.; MANOEL, J. M.; NASCIMENTO, S. A. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos (TEXTO DIDÁTICO). *Cadernos de Geociências*, v. 7, n. 1, 2010.
- URICCHIO, V. F.; GIORDANO, R.; LOPEZ, N. A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution risk evaluation. *Journal of Environmental Management*, v. 73, n. 3, p. 189–197, 1 nov. 2004.