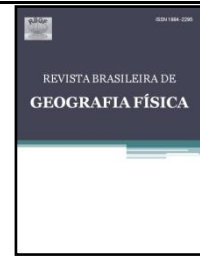




# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



## Processo Investigativo do Potencial de Contaminação de Aquíferos por Atividades Antrópicas da Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Pedras (SP)

Reinaldo Lorandi<sup>1</sup>, Franciane Mendonça dos Santos<sup>2</sup>, José Augusto di Lollo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor Sênior, Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos. Rod. Washington Luís, km 235 - SP-310, CEP 13565-905, São Carlos, Brasil. E-mail: lorandir@gmail.com. <sup>2</sup>Estudante de Pós Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos. Rod. Washington Luís, km 235 - SP-310, CEP 13565-905, São Carlos, Brasil. E-mail: fran.mendonca@hotmail.com (autor correspondente). <sup>3</sup>Professor Titular, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista - UNESP. Alameda Bahia, 550, CEP 15385-000, Ilha Solteira, Brasil. E-mail: jose.lollo@unesp.br.

Artigo recebido em 17/09/2019 e aceito em 18/12/2019

### RESUMO

Um instrumento utilizado no planejamento ambiental de bacias hidrográficas é o zoneamento (geo)ambiental, principalmente no que diz respeito à expansão urbana. Nesse contexto, o trabalho teve como objetivo a elaboração da carta de potencial de contaminação de aquíferos para a bacia hidrográfica do Ribeirão das Pedras (São Paulo, Brasil), na escala de 1:50.000. Esta bacia estende-se por 111,47km<sup>2</sup>, tendo a maior parte de sua área contida no município de Santa Cruz das Palmeiras e algumas parcelas menores nos municípios de Tambaú, Pirassununga e Porto Ferreira. Para a elaboração deste documento cartográfico foram adotados os seguintes procedimentos: delimitação da bacia a partir da articulação de cartas topográficas no software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ArcGis® 10.3; elaboração da carta de formações geológicas da bacia e a classificação do potencial de contaminação, por meio de uma análise multicritério, envolvendo cinco classes: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Como resultado, obteve-se a carta de potencial de contaminação, na qual as classes “alto” e “muito alto” potencial somam 36,31% da área, onde as unidades aquíferas têm grande capacidade de fluxo e armazenamento, os potenciais baixo e muito baixo, se localizam nas unidades aquíferas Intrusivas Básicas e Aquíclodo Corumbataí, com características que limitam a capacidade de percolação e armazenamento de água. O potencial “médio” teve influência positiva da maioria dos atributos (unidades aquíferas, materiais inconsolidados, declividades e formas do terreno), sendo que o único atributo que contribuiu de forma negativa é o uso da terra, devido às práticas agrícolas. O documento pode contribuir para um melhor ordenamento do território respeitando o meio físico e sua capacidade de suporte, de forma a colaborar para gestão da BHRP.

Palavras-chave. Zoneamento (Geo)ambiental; Análise Multicritério; Unidades Aquíferas; Ordenamento Territorial.

## Anthropic Activities in Ribeirão das Pedras Drainage Basin, São Paulo State, Brazil

### ABSTRACT

Geoenvironmental zoning is an instrument widely used in the environmental planning of river basins, especially with regard to urban expansion. In this context, the objective of this study was to prepare a 1:50,000-scale chart of the contamination potential of aquifers for the Ribeirão das Pedras watershed, located in Sao Paulo state, Brazil. This river basin comprises an area of 111.47 km<sup>2</sup>, most of it located in the municipality of Santa Cruz das Palmeiras, with some smaller portions in the municipalities of Tambau, Pirassununga, and Porto Ferreira. The following procedures were conducted for the preparation of this cartographic document: delimitation of the catchment area based on the articulation of topographic charts using the Geographic Information System (SIG) ArcGis® 10.3 software; preparation of a map of geological formations of the basin; and classification of the contamination potential by multicriteria analysis including five classes: very low, low, medium, high, and very high. As a result, a chart of contamination potential was produced showing that the high and very high potential classes comprised 36.31% of the catchment area, where the aquifer units present high water flow and storage capacity; the low and very low potentials are located on the Basic Intrusive and Corumbatai aquifer units, with characteristics that limit the capacity of water percolation and storage; and the medium potential positively influenced most of the attributes (aquifer units, uncontaminated materials, slopes, and geological formations), with land use due to agricultural practices as the only attribute with negative contribution. With this information, it is possible to develop a better land use planning, respecting the physical environment and its support capacity in order to collaborate to the management of this water source.

Keywords: Geoenvironmental zoning; Multi-criteria analysis; Aquifer units; Land use planning.

## Introdução

A degradação do meio ambiente, causada por atividades antrópicas, é um processo que remonta aos primórdios da civilização, sendo um fator que contribui para alterações no ecossistema e ameaça a vida de espécimes animais e vegetais no planeta. Para corrigir os estragos causados, por intermédio do uso e da exploração descontrolada desse meio, faz-se necessária a urgente inversão anual de recursos financeiros em técnicas de prevenção, para que, no futuro tenhamos uma redução nos gastos com ferramentas corretivas.

A expansão das atividades humanas, aliada ao contínuo crescimento da população, faz com que a demanda por recursos hídricos também aumente, provavelmente porque são os únicos recursos que se relacionam com todos os aspectos da civilização humana, desde o desenvolvimento agrícola e industrial até os valores culturais e religiosos. Assim, pode-se dizer que a água é um fator limitante para o desenvolvimento sustentável da sociedade (Tundisi, 2006). Segundo prognósticos emanados no meio científico e reportados por Suguio (2008), águas adequadas ao consumo tornar-se-ão insuficientes e, conseqüentemente, existe a possibilidade de valorizarem-se tanto que se transformarão no “ouro do século XXI”.

As águas subterrâneas constituem-se num recurso natural imprescindível para a vida humana e abastecimento público (Ribeiro, 2009). Com os conhecimentos modernos sobre o ciclo hidrológico e a distribuição da água no planeta, sabe-se que as águas minerais têm origem, como toda água subterrânea, na precipitação pluviométrica e na infiltração na crosta terrestre. A água é uma substância quimicamente muito ativa, que tem grande facilidade de dissolver e reagir com outras substâncias orgânicas e inorgânicas. A composição química dessas águas está condicionada por vários processos, dentre os quais se incluem reações de interação água-solo e/ou água-rocha (Alencão et al., 2009).

A degradação e esgotamento dos recursos hídricos subterrâneos são encadeamentos geralmente lentos cuja manifestação ou detecção leva um tempo longo para se perceber, de forma que fica difícil e muito oneroso reverter essa conjuntura desfavorável (Xavier, 1998). Além de elevar o consumo das águas subterrâneas, a eclosão demográfica está diretamente relacionada com o aumento da poluição dos aquíferos, a partir do momento em que as atividades antrópicas se expandem, modificando tanto a qualidade quanto a

quantidade dessas águas (Menezes et al., 2014; Costa et al., 2015 a; b).

Todos os aquíferos possuem algum tipo de vulnerabilidade à contaminação, que irá matizar em níveis conforme suas características naturais e dos contaminantes em si. Assim, é importante colocar-se em pauta os impactos sofridos e a necessidade de proteção da qualidade das águas subterrâneas. Por esse motivo, fomentar o desenvolvimento de técnicas para a avaliação de material científico é algo de grande relevância, uma vez que pode ser utilizada como base à administração municipal, tendo em vista que o mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos é indissociável do planejamento territorial e hídrico (Foster et al., 2013).

Conservar os recursos hídricos mostra-se de suma importância para a sociedade, sendo essencial em diversas atividades humanas. Todo manancial, superficial ou subterrâneo, deve ser preservado para garantir água em quantidade e com qualidade para as gerações atuais e futuras. Entretanto, o que se tem observado é a visão oposta, ou seja, os recursos existentes têm sido sistematicamente contaminados devido ao uso da terra sem planejamento e controle por parte do Poder Público, mesmo com todo conhecimento técnico existente (Lorandi et al., 2014).

Segundo Calijuri; Cunha e Povinelli (2010), a bacia hidrográfica pode indicar a qualidade ambiental de uma determinada área, permitindo a avaliação de problemas como poluição das águas, assoreamento de cursos d'água e escassez hídrica e sua adoção como unidade físico-territorial representa um avanço no âmbito da sustentabilidade.

As atividades humanas relacionadas ao uso da terra estão diretamente associadas com a contaminação de aquíferos. Em um estudo realizado por Iritani et al. (2013), foram inventariadas e classificadas as principais atividades contaminantes em uma parcela do Estado de São Paulo. As áreas de cultura de cana-de-açúcar, muito presentes em todo o Estado, foram classificadas como pertencentes à um alto potencial de contaminação das águas subterrâneas. As atividades relacionadas às áreas urbanas, também foram previstas como um alto potencial de contaminação, principalmente àquelas ligadas às questões relacionadas com o saneamento básico.

O Município de Santa Cruz das Palmeiras, posicionado no interior do Estado de São Paulo, não foge à regra, sofrendo pressões antropogênicas

sobre suas águas subterrâneas, decorrentes do uso intensivo de suas terras pelo setor agro-sucroalcooleiro. Outras ações de cunho humano, desenvolvidas na Bacia do Ribeirão das Pedras, também afetam a qualidade das águas superficiais, com a ocorrência de assoreamento, erosão, desmatamento da vegetação ciliar e aporte de efluentes domésticos e industriais, conforme relatado por Magini e Chagas (2003), numa bacia regionalmente próxima e com o mesmo tipo de uso e cobertura.

Com o advento das técnicas de geoprocessamento no estudo dos recursos hídricos (Bielenki e Barbassa, 2012), o cômputo de dados geotécnicos, feito a partir desta ferramenta, tem se mostrado cada vez mais presente, facilitando o aproveitamento destes dados pelos órgãos estaduais e municipais, no intuito de auxiliar o planejamento do uso e ocupação do solo de cada território investigado.

Pelo exposto, mostra-se de suma importância a obtenção de dados geotécnicos específicos de uma bacia hidrográfica para contribuir com o planejamento territorial dessa área física. Portanto, o presente estudo tem como objetivo elaborar uma carta de potencial de contaminação de aquíferos para a Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Pedras (BHRP), como subsídio para a tomada de decisão da administração pública, no sentido da proteção dos recursos hídricos subterrâneos.

### Caracterização ambiental da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Pedras (BHRP) localiza-se na região centro-leste do Estado de São Paulo e faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Rio Mogi Guaçu – UGRHI 9. Compreendendo uma área de drenagem de 111,47km<sup>2</sup>, essa bacia de quarta (4<sup>a</sup>) ordem, com padrão de drenagem dendrítica (Christofolletti, 1974), tem como coordenadas (UTM) extremas: nascente (NO) – E252383.279m, N7590710.299m; nascente (NE) – E262962.400m, N7591473.888m e foz – E252545.067m e N7578471.073m, fuso 23S (Datum: Córrego Alegre). As unidades aquíferas (Figura 1) estão distribuídas por aquíferos: fraturado e semiconfinado, representado pela Formação Serra Geral – Intrusivas Básicas (50,47% da área); aquíferos sedimentares, porosos, livres e parcialmente livres, nas formações Pirambóia, Pirassununga e Aluvionares, somando 18,94% da área; e aquícludo na Formação Corumbataí (30,58% da área).

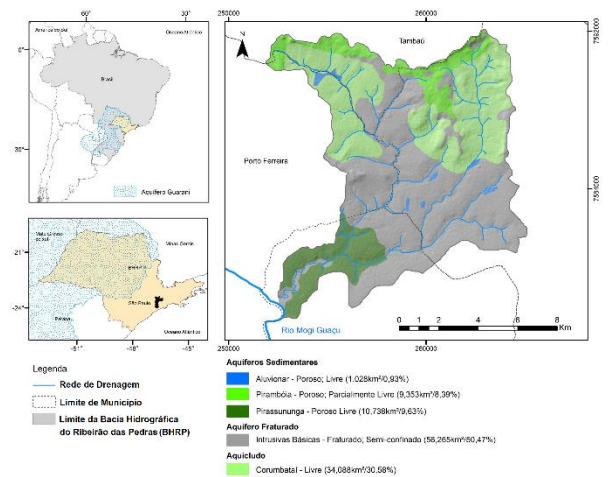


Figura 1. Área de Estudo – posicionamento geográfico e unidades aquíferas.

Segundo informações emitidas pelo Fundo Estadual de Recursos Hídricos – FEHIDRO (2011), o território brasileiro se mostra dividido em Regiões Hidrográficas estabelecidas pela Resolução no32 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos de 15 de outubro de 2003. Na caracterização em nível federal, a Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu pertence à Região Hidrográfica do Paraná, constituída pela Bacia Hidrográfica do Rio Paraná.

No Estado de São Paulo, a Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu (UGRHI-09) localiza-se na região nordeste do Estado. Essa UGRHI apresenta limites com as UGRHI's: Piracicaba/Capivari/Jundiaí; Tietê/Jacaré; Tietê/Batalha; Turvo/Grande; Baixo Pardo/Grande e Pardo. Uma das sub-bacias dessa UGRHI é a do Ribeirão das Pedras, que está toda inserida no compartimento Médio Mogi Superior, e o Rio está classificado como um curso d'água classe 2. Segundo (Feitosa, 2008), essa bacia hidrográfica encontra-se localizada na Província Hidrogeológica da Bacia do Paraná, caracterizada por apresentar valores de capacidade específica acima de 10 m<sup>3</sup>/h.m<sup>-1</sup> e no Subdomínio Bacia do Paraná (2Pr), caracterizado por apresentar de muita alta a média favorabilidade hidrogeológica (incluem as principais unidades aquíferas da bacia sedimentar, representadas pelas formações Botucatu, Pirambóia, Guará, Caiuá, Bauru, Furnas, etc).

Numa versão mais detalhada da distribuição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo (escala 1:1.000.000), nota-se, no mapa elaborado por São Paulo - DAEE-IG-IPT-CPRM, 2005, que a bacia hidrográfica objeto de estudo encontra-se territorialmente envolvida pelos aquíferos Guarani (aflorante) e Serra Geral Intrusivas.

O clima da região estudada é classificado, de acordo com o Sistema de Köppen, como sendo do

tipo Cwa, isto é, mesotérmico úmido subtropical de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18° C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C. Do ponto de vista de balanço hídrico, há uma nítida distinção entre a estação seca (maio a setembro), com consequente deficiência hídrica, e a chuvosa (outubro a abril).

A partir da interpretação de imagens de satélite, feita por Oliveira (1995) e dos trabalhos de campo realizados por Torezan (2000), foram identificadas e classificadas as formações vegetais remanescentes na área da proposta de APA de Descalvado sugerida pelo mesmo autor. Com essa abordagem, foi possível a identificação das principais formações vegetais como cerrado (cerradão e cerrado “senso estrito”), mata mesófila (floresta estacional semidecidual) e mata ciliar. Esses remanescentes se encontram dispersos em manchas relativamente isoladas no meio da ocupação agrícola, onde a maior reserva atinge cerca de 1000 hectares.

Segundo a divisão geomorfológica do Estado de São Paulo (Ross e Moroz, 1997), a área de estudo localiza-se na Unidade Morfoestrutural Bacia Sedimentar do Paraná, com sua maior parte situada na Unidade Morfoescultural do Planalto Ocidental Paulista e uma menor porção abrangendo a Unidade Morfoescultural da Depressão Periférica Paulista.

Numa escala geológica continental, a área está inserida no domínio geológico denominado Cobertura Fanerozóica (inclusive da Província Sub-andina), na compartimentação geotectônica Cráton Paraná, na Província Estrutural do Paraná (HASUI, 2012). No que se refere a geologia regional, mapeada por Cavalcante (1979) na escala 1:250.000, estão distribuídas nessa área física as seguintes unidades litológicas: lavas basálticas toleíticas (Formação Serra Geral, Triássico), arenitos médios a muito finos (Formação Pirambóia, Triássico) e argilitos, folhelhos e siltitos (Formação Corumbataí, Permiano).

Quanto à geologia local, a BHRP apresenta arenitos fluviais da Formação Pirambóia, siltitos da Formação Corumbataí, sedimentos terciários da Formação Pirassununga, rochas Intrusivas Básicas e depósitos recentes do Quaternário.

## Material e métodos

Os planos de informação georreferenciados utilizados no trabalho foram elaborados utilizando o software ArcGIS® 10.3 (ESRI, 2015). Para a montagem do banco de dados, foram empregados os seguintes cartogramas, todos na escala 1:50.000: mapa topográfico da quadrícula de Pirassununga (SF-23-V-C-V-3), produzido por BRASIL - IBGE (1983); mapa das formações geológicas de superfície SÃO PAULO - IG (1981) e mapa de materiais inconsolidados (Galiano et al., 2016), as principais unidades estão descritas na Tabela 1. Também foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT 8 de 22/04/2016, composição colorida RGB das bandas 4, 5 e 6 com fusão com a banda pancromática 8 de 15 metros (United States – USGS, 2014) para elaboração do mapa de cobertura e uso da terra.

O mapa curvatura horizontal refere-se ao caráter divergente/convergente dos fluxos de água sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal. Por sua vez, a curvatura vertical refere-se ao caráter côncavo/convexo da vertente, quando analisado em perfil (Valeriano e Carvalho Junior, 2003). Neste caso, a combinação das curvaturas horizontal e vertical foi extraída de Valeriano (2008) resultando nas seguintes formas de terreno: convergente-côncava, convergente-retilínea, convergente-convexa, planar-côncava, planar-retilínea, planar-convexa, divergente-côncava, divergente-retilínea e divergente-convexa.

Tabela 1. Caracterização dos materiais inconsolidados (Galiano et al., 2016).

Material Inconsolidado	Área		Espessura (m)	Granulometria (%)			Permeabilidade (cm/s)
	(Km <sup>2</sup> )	(%)		Areia	Silte	Argila	
Aluvionar	1,31	1	<2, 2-5, >5	75	8	17	6,51x10 <sup>-3</sup>
Retrabalhado Pirassununga	10,9432	10	<2, 2-5, >5	85	4	11	1,93x10 <sup>-2</sup>
Residual Pirambóia	1,4832	1	<2, 2-5, >5	77	6	17	1,01x10 <sup>-3</sup>
Retrabalhado Pirambóia	7,9697	7	<2, 2-5	54	24	22	2,30x10 <sup>-3</sup>
Residual Serra Geral	37,9542	34	<2, 2-5	35	19	46	2,02x10 <sup>-4</sup>
Retrabalhado Serra Geral	18,6255	17	<2, 2-5	32	22	46	2,95x10 <sup>-8</sup>
Residual Corumbataí	30,1965	27	<2, 2-5	30	29	41	6,24x10 <sup>-7</sup>
Retrabalhado Corumbataí	2,9899	3	<2, 2-5	69	9	22	7,68x10 <sup>-5</sup>

Para atingir o objetivo proposto, empregou-se uma estratégia de análise multicritério, fundamentada em matrizes de decisão e na avaliação dos critérios por equipe multidisciplinar, a qual se caracteriza pelo cruzamento de atributos do meio físico e antrópicos em ambiente SIG. O fluxograma apresentado na Figura 2 descreve a metodologia utilizada. Os atributos determinantes na escolha das classes foram: as Unidades Aquíferas, devido às características geológicas de cada material e as Formas do Terreno associadas às declividades, onde as formas côncavas são coletoras e as convexas são dispersoras.

Cabe ressaltar que as áreas de vegetação de preservação permanente e os corpos d'água existentes foram excluídos das análises realizadas, devido às mesmas possuírem restrições legais de

uso (protegidas) ou representarem áreas reconhecidamente sem potencial de contaminação.

A análise multicritério baseada nos pesos definidos foi fundamentada na metodologia descrita por Costa et al. (2015b), que consistiu na integração de plano de informação em ambiente SIG, por meio de matrizes de decisão, utilizando a ferramenta “Soma Ponderada” - Weighted Sum do ArcGIS® 10.3 (ESRI, 2015). Os cruzamentos dos atributos geoambientais foram realizados aos pares, sendo que os pesos, com valores variando de 1 a 5 (muito baixo a muito alto), foram estabelecidos a partir da experiência e do conhecimento dos pesquisadores, conforme as Tabelas 2 a 6.

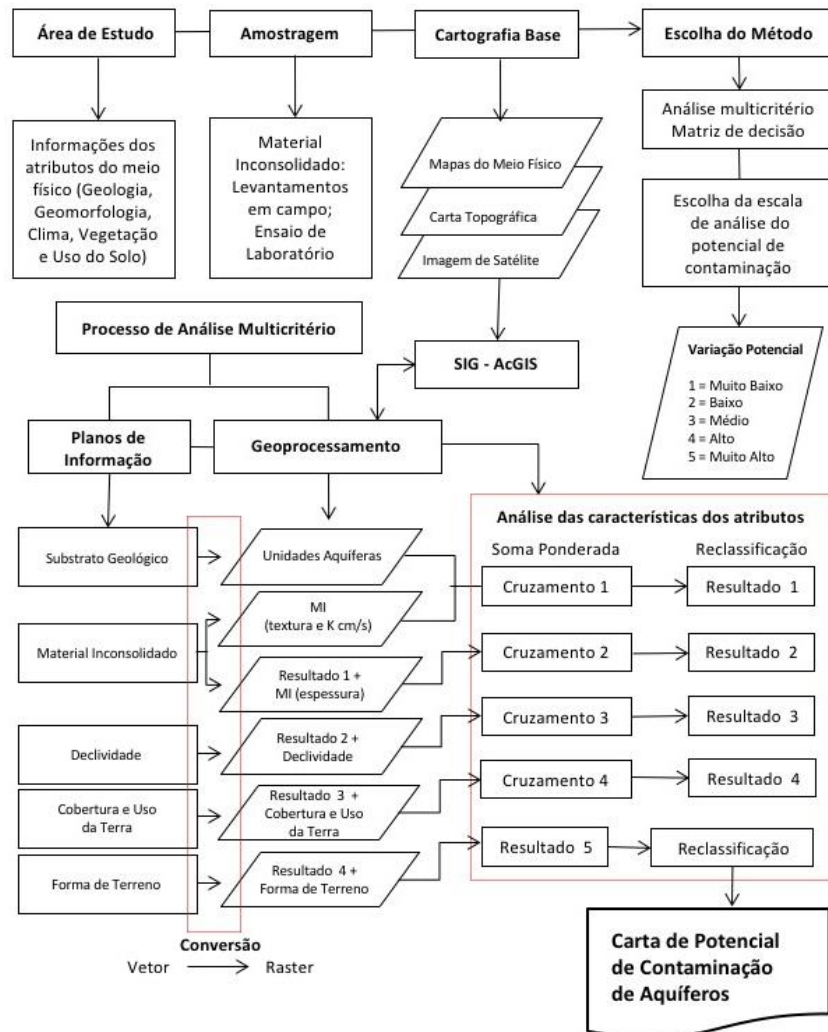


Figura 2. Fluxograma de materiais e processo de análise multicritério.

Tabela 2. Unidades Aquíferas X Material Inconsolidado (textura e permeabilidade).

Cruzamento 1	Unidades Aquíferas				Aquicludo	
	Sedimentares			Fraturado		
	Aluvionar: poroso, livre	Pirambóia: poroso, parcialmente livre	Pirassununga: poroso, livre	Intrusivas Básicas: semi- confinado		
				Intrusivas Básicas: semi- confinado	Corumbataí: livre	
Material Inconsolidado (textura e permeabilidade)	Aluvionar	5	5	5	3	3
	Ret. Pirassununga	5	4	5	3	3
	Res. Pirambóia	5	4	4	3	3
	Ret. Pirambóia	5	4	4	3	3
	Res. Serra Geral	5	3	3	2	2
	Ret. Serra Geral	5	3	3	2	2
	Res. Corumbataí	5	3	3	2	1
	Ret. Corumbataí	5	3	3	2	1

Tabela 3. Resultado 1 X Material Inconsolidado (espessura).

Cruzamento 2	Material Inconsolidado (Espessura)		
	>5m	2-5m	<2m
Muito Baixo 1	1	2	3
Baixo 2	1	2	3
Médio 3	2	3	4
Alto 4	3	4	5
Muito Alto 5	4	5	5

Tabela 4. Resultado 2 X Declividade (%).

Cruzamento 3	Declividade (%)				
	>20	15-20	10-15	5-10	<5
Muito Baixo 1	1	1	1	2	3
Baixo 2	1	1	2	3	4
Médio 3	2	2	3	4	4
Alto 4	3	4	4	5	5
Muito Alto 5	3	4	5	5	5

Tabela 5. Resultado 3 X Cobertura e Uso da Terra.

Cruzamento 4	Cobertura e Uso da Terra				
	Áreas Agrícolas	Corpos Hídricos	Pastagem	Vegetação Nativa	Área Rural
Muito Baixo 1	2	3	1	1	2
Baixo 2	3	3	2	1	3
Médio 3	4	4	3	2	4
Alto 4	5	5	4	2	4
Muito Alto 5	5	5	5	3	5



Tabela 6. Resultado 4 X Forma do Terreno.

Cruzamento 5	Forma do Terreno								
	Convergente			Planar			Divergente		
	côncava	retilínea	convexa	côncava	retilínea	convexa	côncava	retilínea	convexa
Muito Baixo 1	3	2	2	2	2	1	1	1	1
Baixo 2	4	4	4	3	3	3	2	2	2
Médio 3	4	4	4	4	3	3	3	2	2
Alto 4	5	5	5	5	4	4	5	4	4
Muito Alto 5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

**Resultados e discussão**

A elaboração de mapas intermediários, como de materiais inconsolidados, de cobertura e uso da

terra (2016), de declividade (resolução espacial 10x10m) e de formas do terreno, foi necessária para realizar os cruzamentos dos atributos (Figura 3).

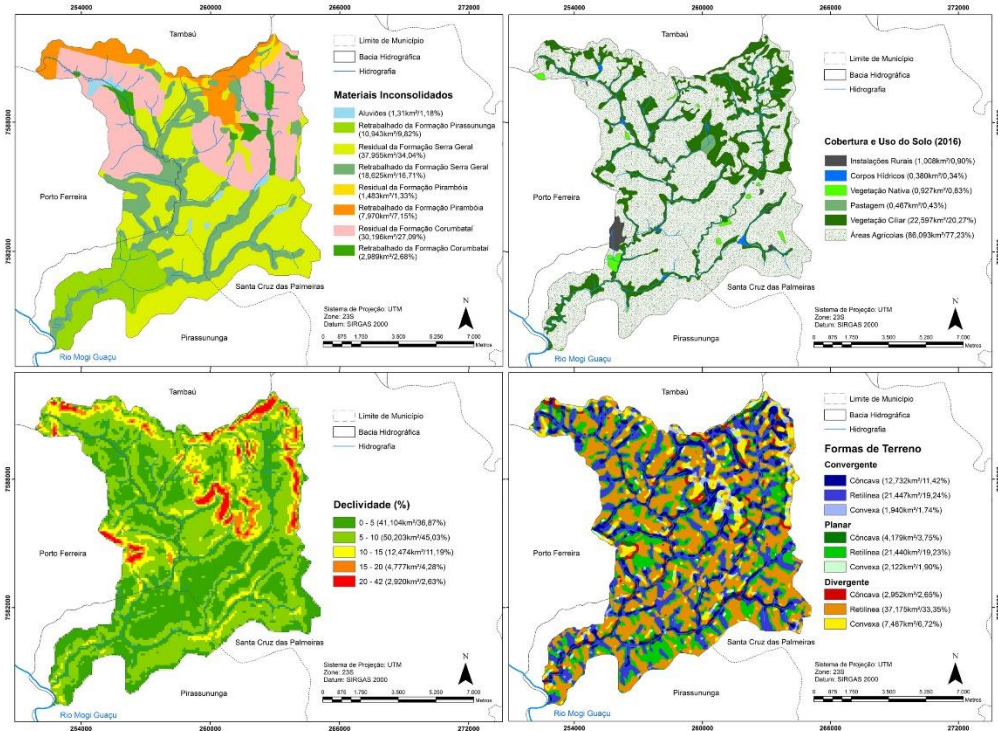


Figura 3. Atributos utilizados no processo de análise multicritério..

A unidade Residual Serra Geral ocupa maior área dos materiais inconsolidados, com 34,04% do total, seguido das Formações: Residual do Corumbataí (27,09%) e Retrabalhado da Serra Geral (16,71%).

O mapa de cobertura e uso da terra tem grandes porções de áreas agrícolas e instalações rurais, com aproximadamente 78,13% do total da área, e os outros 21,87% distribuídos em pastagem,

vegetação natural e a rede de drenagem. As declividades mais altas concentram-se na porção centro-norte da bacia, estão acima de 10%, mas em relação à área representam menos de 20% do total, sendo essas as mais favoráveis ao escoamento superficial, consequentemente, diminuindo o tempo de infiltração dos contaminantes.

As formas de terreno apresentaram relevância na identificação das unidades homogêneas do

relevo, influenciando na capacidade de acúmulo ou migração de fluxos e partículas. As formas divergentes ocorrem em maior número entre os perfis horizontais, com aproximadamente 43% da área, as formas convergentes 32% e retilíneas 25%.

### **Contaminação de aquíferos por atividades antrópicas**

Para a elaboração de uma carta temática é imprescindível, segundo Pejon (1992), o conhecimento adequado das características do meio físico, ou seja, seus componentes (substrato geológico, materiais inconsolidados, relevo, entre outros) e atributos destes (litologia, granulometria, espessura, declividade, landforms). Por exemplo, as condições de materiais inconsolidados existentes na área constituem o elemento preponderante para avaliação do potencial de contaminação dos aquíferos, uma vez que a textura, a permeabilidade do solo, a espessura e as condições de ocorrência de água no perfil desses materiais são os atributos que influem de forma decisiva no processo de contaminação.

Pela metodologia proposta, o resultado do cruzamento dos cinco atributos do meio físico foi a Carta de Potencial de Contaminação de Aquíferos (Figura 4), dividida em cinco classes: muito baixo, baixo, médio, alto, e muito alto, descritas a seguir.

A classe de potencial muito baixo, 2,91% da área, compõe-se de atributos que contribuem fortemente para essa condição. Nessas áreas, as unidades aquíferas e de materiais inconsolidados, coincidem com as Formações Serra Geral e Corumbataí, apresentando materiais com textura predominantemente argilosa e coeficiente de permeabilidade do solo no intervalo de 10-4 a 10-8cm/s. A cobertura da terra é de vegetação natural, o que teoricamente contribuiria muito pouco ou nada para a contaminação dessas áreas. Com declividades de 0-5 e 5-10%, as formas do terreno são divergentes, fatores que evidenciam substancial influência no equilíbrio entre a infiltração e escoamento superficial.

Em termos de distribuição espacial, a classe “baixo potencial” é a mais expressiva, por abranger 37,84% do total da área, e apresenta os seguintes atributos limitantes: materiais retrabalhados dos solos das formações Pirassununga e Pirambóia, que são materiais de textura bastante arenosa, com até 85% de areia na composição, e coeficiente de permeabilidade variando entre 10-2 a 10-3cm/s. A cobertura da terra tem influência decisiva nesse diagnóstico, pois na maior porcentagem está o uso para atividades agrícolas, predominantemente para

o cultivo de cana-de-açúcar. E ficou evidente que o atributo forma do terreno foi o principal restritivo da classe. A forma divergente retilínea está distribuída em 33,35% da área e quase 100% contida na classe baixo potencial. As formas divergentes têm maior dispersão de fluxos, sendo máxima nas divergente-convexas.

De forma análoga à classe anterior, esta classe com potencial médio (22,94% da área) à contaminação reúne unidades aquíferas livres, fraturadas; semi-confinadas, com cobertura de materiais inconsolidados argilosos de espessura baixa a média, com coeficiente de permeabilidade entre 10-4 e 10-8 cm/s e intenso uso agrícola. A forma de terreno predominante é planar retilínea (19,23% da área), que diferentemente das formas côncavas/convexas, depende de outros atributos mais do que a forma do terreno. As declividades variam entre 0-5 e 5-10% e em alguns locais chegam a 10-15%.

A forma de terreno teve papel determinante a classe de alto potencial, classe que abrange 26,71% da área, distribuída por toda a bacia, nos fundos de vale, com encostas côncavas que resultam áreas com grande capacidade de armazenamento e concentração de fluidos. O segundo atributo que mais influenciou foi a geologia, em particular as unidades aquíferas das formações Pirambóia (Porosa e Parcialmente Livre) e Pirassununga (Porosa Livre), com alta porcentagem de areia, em alguns locais até 85%, coeficiente de permeabilidade alta (10-2, 10-3cm/s) e grande capacidade de armazenamento de água no solo. Há ainda a influência da declividade, considerada baixa, entre 0-5 e 5-10% e o uso da terra em atividades agrícolas, quase exclusivamente para o plantio de cana.

Discordante da classe de potencial alto, a classe “muito alto” teve como principal influência as características dos materiais de origem do atributo unidades aquíferas da Formação Pirambóia, de textura arenosa, com solos rasos de até 5 metros de profundidade e alta capacidade de infiltração, coeficiente de permeabilidade 10-3cm/s e valores de declividades superiores aos 20% em alguns locais. No tocante aos materiais inconsolidados oriundos da Formação Pirassununga, também com textura arenosa e perfis de solo que ultrapassam os 5 metros, o coeficiente de permeabilidade é de 10-2cm/s e as declividades ficam entre 0-5 e 5-10%. A cobertura do solo, nessa classe, é representada, basicamente, pelo cultivo de cana de açúcar.

Apesar de não serem registradas grandes áreas com risco muito alto de contaminação, vale ressaltar que aproximadamente 77,5% da área é



destinada ao cultivo agrícola, onde são utilizados diferentes tipos de agrotóxicos.

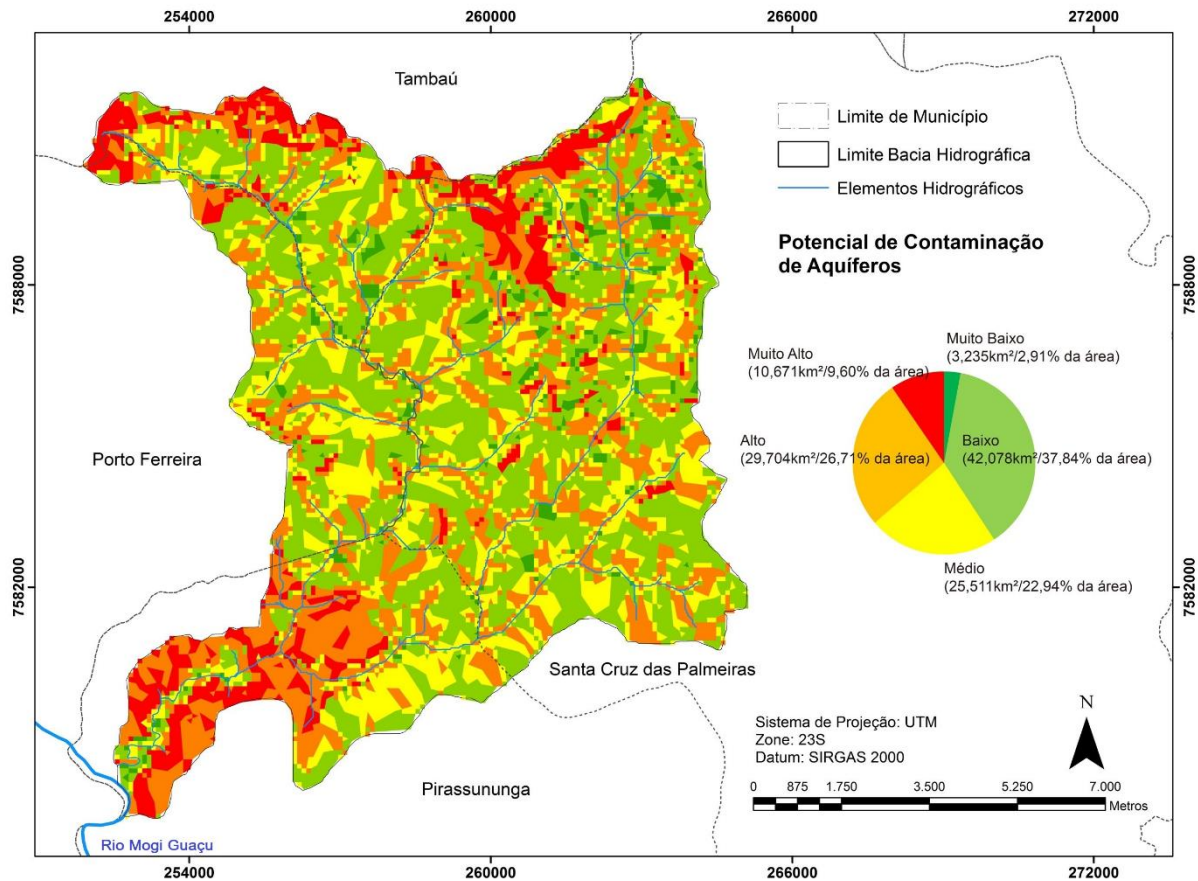


Figura 4. Carta de potencial de contaminação de aquíferos.

## Conclusões

A Análise Multicritério, como método de investigação, mostra-se efetiva quando aplicada na gestão e planejamento do espaço dentro de um determinado contexto, como por exemplo, na determinação de áreas com potencial de contaminação em aquíferos. A associação das classes de potenciais “alto” e “muito alto”, abrangendo em 36,31% da área total da bacia, apresenta um elevado potencial de contaminação, o que pode ser explicado por coincidirem em alguns pontos com as nascentes (porção norte) que formam a rede de drenagem da bacia e também com a vegetação ciliar, considerada uma proteção natural. O agravante, nesta região, é o cultivo de cana-de-açúcar que eleva o risco de contaminação do solo por defensivos agrícolas.

Em contrapartida, as áreas consideradas com potenciais “baixo” e “muito baixo” de contaminação apresentam a maior parcela da área,

40,75% do total da bacia e situam-se sobre a Unidade Aquífera Intrusivas Básicas e o Aquíclodo Corumbataí, com características que limitam a capacidade de percolação e armazenamento de água, o que possibilita o uso da terra para fins agrícolas.

O potencial “médio” teve influência positiva da maioria dos atributos e é representado por unidades aquíferas com características que dificultam a percolação e o armazenamento de contaminantes; suas declividades favorecem o escoamento superficial, consequentemente diminuindo o tempo de concentração de fluidos, suas formas do terreno são dispersoras de fluxos. O único atributo que contribui de forma negativa é o uso da terra, com o cultivo de cana-de-açúcar.

Com base nos atributos analisados, foi possível compreender a influência de cada fator no meio físico por meio da elaboração da Carta de Potencial de Contaminação de Aquíferos, que auxilia o zoneamento (geo)ambiental da região utilizado no planejamento ambiental de bacias

hidrográficas, de forma a reduzir o impacto negativo no meio físico causado pela presença antrópica e possibilita uma harmonia entre suas componentes.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão de recursos financeiros, aportados ao Processo nº. 2013/03699-5, os quais possibilitaram a geração de resultados laboratoriais essenciais na elaboração deste trabalho e informam que “o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”.

### Referências

- Alencão, A.M., Souza Oliveira, A., Ribeiro dos Reis, A., 2009. Elementos vestigiais em águas subterrâneas: análise multivariada e espacial. Portugal e Centro de Geofísica, Instituto Geofísico da Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal. *Geochimica Brasiliensis* 23(3) 303-314.
- Bielenki, C. J., Barbassa, A. P., 2012. Geoprocessamento e recursos hídricos: aplicações práticas, 1 ed. EdUFSCar, São Carlos.
- Cavalcante, J. C., 1979. Projeto Sapucaí: relatório final de geologia (No. 5). Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral.
- Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1983. Folha topográfica de Piraçununga (SF-23-V-C-V-3). São Paulo: IBGE. Escala 1:50.000.
- Calijuri, M. do C., Cunha, D. G. F., Povinelli, J., 2010. Sustentabilidade: um desafio da gestão dos recursos hídricos. EESC-USP, São Carlos.
- Christofolletti, A., 1974. Geomorfologia. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Costa, C.W., Piga, F.G., Moraes, M.C.P., Dorici, M., Sanguinetto, E.C., Lollo, J.A., Moschini, L.E., Lorandi, R., Oliveira, L. J., 2015a. Fragilidade ambiental e escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras - Araras, SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20(4), 946-958. DOI: 10.21168/rbrh.v20n4.p946-958.
- Costa, C.W., Moraes, M.C.P., Cançado, C.J., Guerrero, J.V.R., Marangon, F., Lorandi, R., Lollo, J.A., Moschini, L.E., 2015b. Potencial de contaminação de aquíferos por atividades antrópicas da Bacia do Ribeirão do Meio – Município de Leme – SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20, 218-225. DOI: 10.21168/rbrh.v20n1.p218-225.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2015. ArcGIS for the desktop 10.3.
- Feitosa, F.A.C., 2008. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. CPRM: LABHID, Rio de Janeiro.
- FEHIDRO. Plano da Bacia Hidrográfica: 2008-2011, 2011. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Mogi Guaçu, CETESB - SÃO PAULO. 170p.
- Foster, S., Hirata, R., Andreo, B., 2013. The aquifer pollution vulnerability concept: aid or impediment in promoting groundwater protection?. *Hydrogeology Journal* 21(7), 1389-1392.
- Galiano, V.A., Lorandi, R., Lollo, J.A., 2016. Proposta de ordenamento territorial da bacia hidrográfica do Rio das Pedras (SP), na escala 1:50.000: potencial à escavabilidade dos maciços de solos. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* (36), 29-39.
- Hasui, Y., 2012. Compartimentação geológica do Brasil. *Geologia do Brasil*. Beca, São Paulo.
- Iritani, M.A., Rossini-Penteado, D., Ezaki, S., Oda, G.H., 2013. Proposta de classificação das fontes potenciais de contaminação da água subterrânea. *Revista do Instituto Geológico* [online] 34(2), 1-26. Disponível: [http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?pid=S0100-929X2013000200001&script=sci\\_arttext](http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?pid=S0100-929X2013000200001&script=sci_arttext). Acesso: mar. 2016. DOI: 10.5935/0100-929X.20130006.
- Lorandi, R., Cançado, C.J., Oliveira, A.R., Moraes, M.E.B., 2014. Investigação Preliminar da Potencialidade de Contaminação nas Unidades Aquíferas da Bacia Hidrográfica do rio Almada (BA). In: XII Simpósio De Recursos Hídricos Do Nordeste. Disponível: <http://eventos.abrh.org.br/xiisrh/anais/papers/PAP018214.pdf>. Acesso: mar. 2016.
- Magini, C., Chagas, R.L., 2003. Microzoneamento e diagnóstico físico-químico do Ribeirão das Araras, Araras - SP. *Geociências* 22(2), 195-208.

- Menezes, J.P.C., Bertossi, A.P.A.B., Santos, A.R., Neves, M.A., 2014. Correlação entre uso da terra e qualidade da água subterrânea. *Engenharia Sanitária e Ambiental* [online] 19, 173-186. Disponível: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522014000200173&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522014000200173&script=sci_arttext). Acesso: mar. 2016.
- Oliveira, H.H., 1995. Proposta de criação e caracterização da Área de Proteção Ambiental de Descalvado, SP. Dissertação (Mestrado). São Paulo, USP.
- Pejon, O.J., 1992. Mapeamento geotécnico da Folha de Piracicaba-SP (Escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação de atributos. Tese (Doutorado). São Carlos, USP.
- Ribeiro L., (2009) Águas subterrâneas [Groundwater]. In: Pereira H., Domingos T., Vicente L., Proença V. (Org.), *Ecosistemas e Bem-Estar Humano em Portugal, Avaliação para Portugal do Millennium Ecosystem Assessment*. Escolar Editora, Lisbon, pp 381-411.
- Ross, J.L.S., Moroz, I.C., 1997. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Laboratório de Cartografia Geotécnica. FFLCH/USP. IPT/FAPESP, São Paulo.
- São Paulo - DAEE-IG-IPT-CPRM, 2005. Mapa de águas subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000.
- São Paulo - IG. Secretaria do Meio Ambiente. Instituto Geológico, 1981. Formações Geológicas de Superfície. Folha de Piraçununga (SF-23-V-C-V-3). IG, São Paulo.
- Suguio, K., 2008. Água: Palavra-chave do Ambiente e da Vida. In: *Mudanças Ambientais da Terra*. Instituto Geológico, São Paulo.
- Tavanti, D.R., Moura, S., Azevedo, F.Z., Medvedchikoff, T.G., Rodrigues de Deus, L., Moreira, M.A.A., Lorandi, R., Cancado, C. J., Martins, M.M.R., 2009. Estudo da Vulnerabilidade de Contaminação de Aquífero por Agrotóxicos, na Região de Descalvado e Analândia (SP). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 14, 53-61.
- Torezan, F.E., 2000. Análise ambiental da Bacia do Rio Bonito (Descalvado, SP) com ênfase nas atividades de exploração mineral de areia. Dissertação (Mestrado). São Carlos, UFSCar.
- Tundisi, J. G., 2006. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos. *Revista USP*, São Paulo, 70, 24-35.
- United States – United States Geological Survey (USGS). LANDSAT\_8. Cena: LC82200752014078LGN00. Disponível: <http://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso: 20 abr. 2016.
- Valeriano, M.M., 2008. Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível: <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>. Acesso: 20 jun. 2015.
- Valeriano, M.M., 2003. Carvalho Júnior, O. A. Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 4, 17-29.
- Xavier, J.M., 1998. Protección de acuíferos. In: Alicia Fernández Cirelli (Org.), *Agua “Problemática Regional”: Enfoques y perspectivas en el aprovechamiento de recursos hídricos*. EUDEBA, Buenos Aires, pp. 153-158.