

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N<sup>o</sup> 68/2, Edição Especial Aplicações dos SIG: 391-406  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **GEOPROCESSAMENTO APLICADO A ANÁLISE DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE DRASTIC NO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI EM RIBEIRÃO BONITO - SP**

*Geoprocessing Applied to the Analysis of DRASTIC Vulnerability Index of the Guarani Aquifer System in Ribeirão Bonito – SP*

**Rafael Gonçalves Santos<sup>1</sup>, Mara Lúcia Marques<sup>2</sup> & José Ricardo Sturaro<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade de Lisboa – ULISBOA**  
**Instituto de Geografia e Ordenamento do Território Edifício - IGOT**  
R. Branca Edmée Marques, 1600-276 Lisboa, Portugal  
faelgeo89@hotmail.com

**<sup>2</sup>Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”– UNESP**  
**Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente**  
Av. 24A, Bela Vista, 1515, Rio Claro – SP, Brasil  
maralucia.marques@hotmail.com

**<sup>3</sup>Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”– UNESP**  
**Departamento de Geologia Aplicada**  
Av. 24A, Bela Vista, 1515, Rio Claro – SP, Brasil  
sturaro@rc.unesp.br

*Recebido em 4 de Agosto, 2014/ Aceito em 11 de Novembro, 2015*  
*Received on August 4, 2014/ Accepted on November 11, 2015*

### **RESUMO**

A crescente demanda pelos recursos hídricos subterrâneos e a ausência de diretrizes no ordenamento territorial em áreas de recarga do Sistema Aquífero Guarani (SAG) são as bases para realização deste estudo, realizado com o objetivo de mapear a vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito, região central do Estado de São Paulo, mediante à aplicação dos índices DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*. A análise da vulnerabilidade buscou identificar áreas vulneráveis à contaminação, por meio do uso de técnicas de geoprocessamento, análise e integração de dados em SIG. Os resultados indicam que a região apresenta uma vulnerabilidade classificada entre baixa, média e alta, sendo o percentual de áreas com alta vulnerabilidade mostrou-se superior ao somatório das áreas com baixa e média vulnerabilidade em ambas as análises. O mapeamento da vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito constitui uma importante ferramenta e instrumento de gestão pública, fornecendo ao município, diretrizes para o gerenciamento e ordenamento de futuras atividades a serem instaladas, atuando na proteção dos recursos hídricos subterrâneos, com vistas a minimizar os impactos em áreas de recarga do SAG.

**Palavras chaves:** Geoprocessamento, Vulnerabilidade de Aquíferos, DRASTIC, Ribeirão Bonito.

### **ABSTRACT**

The increasing demand for groundwater resources and the absence of guidelines on the territorial planning in recharge areas of the Guarani Aquifer System (GAS), are the basis for this study, which aims to map the vulnerability of GAS

in the municipality of Ribeirão Bonito, central region of São Paulo states, by the application of DRASTIC and Pesticide DRASTIC index. The analysis of vulnerability sought to identify vulnerable areas to contamination, through the use of Geoprocessing techniques, analysis and data integration in GIS. The results indicate that, the region presents a vulnerability rated between low, mid and high, with the percentage of areas with high vulnerability, proved superior to the sum of the areas with low and mid vulnerability, in both analyses. The vulnerability mapping of GAS in Ribeirão Bonito is an important tool and instrument of public administration, providing to the municipality, guidelines to the management and planning of future activities to be installed, acting in the protection of groundwater resources, with a view to minimizing the impacts in recharge areas of SAG.

**Keywords:** Geoprocessing, Vulnerability of Aquifers, DRASTIC, Ribeirão Bonito.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é o elemento natural presente em todas as atividades desenvolvidas pelo homem, sendo um dos recursos naturais que mais apresentaram aumento na exploração nas últimas décadas. Segundo Alberti e Silva (2005), avalia-se que todas as atividades que necessitam de seu uso, tais como: a recreação, indústria, agricultura, produção de energia, navegação e principalmente o abastecimento público, também podem ser consideradas potencialmente poluentes, com variação de intensidade e formas.

A exploração de águas subterrâneas para abastecimento a complementação do fornecimento de água nas áreas urbanas, tornou-se uma opção que vem registrando um expressivo incremento nos últimos anos, sendo vários núcleos urbanos abastecidos de forma exclusiva ou complementar por esta fonte (MENESES, 2007).

No caso brasileiro, a utilização das águas subterrâneas cresce com o passar dos anos. Conforme a análise de Silva (2003), nas últimas décadas verificou-se uma tendência da captação e utilização de águas subterrâneas para abastecimento público, além de uma crescente preocupação do risco de contaminação nos aquíferos, relacionada à exploração irracional.

O mesmo quadro é verificado no Estado de São Paulo, no qual a maior parte dos núcleos urbanos é suprida total ou parcialmente por águas subterrâneas. Em sua maioria, por meio do uso da rede pública, ao passo que, em algumas bacias no oeste do Estado, estes valores podem atingir cifras superiores a 85% (HIRATA e SUHOGUSOFF, 2004).

Dados da CETESB (1997) indicam que as águas subterrâneas representam o mais importante recurso para o abastecimento público dos municípios paulistas. No estado de São

Paulo, dos 645 municípios, 462 (71,6%) são abastecidos total ou parcialmente por águas subterrâneas, sendo que deste total, 308 (47,7%) são municípios totalmente abastecidos por este recurso, incluindo as águas provenientes do Sistema Aquífero Guarani (SAG).

O SAG é um grande reservatório de águas subterrâneas, que se estende por uma área de 1.087.879,15 km<sup>2</sup>, ocupando partes do território do Brasil, Uruguai, Argentina e Paraguai. Trata-se de um dos maiores reservatórios de água doce do mundo, sua grandeza e, principalmente, a sua localização geográfica, fazem dele um importantíssimo manancial hídrico, constituindo em uma reserva estratégica para o abastecimento da população e para o desenvolvimento socioeconômico da região de sua abrangência (BOSCARDIN BORGUHETTI et al., 2004).

O panorama da crescente demanda e exploração de água do SAG nos municípios paulistas implica em especial preocupação com a proteção dos aquíferos. Foster (1987) ressalta a dificuldade e a impraticabilidade de se promover a remoção de poluentes de fontes pontuais de captação (poços), e devido ao fato da reabilitação de um aquífero poluído requerer custos muito elevados.

Apoiado nessas premissas, este trabalho objetiva elaborar o mapeamento e análise da vulnerabilidade do SAG no município de Ribeirão Bonito – SP, por meio da aplicação do índice DRASTIC, de avaliação e mapeamento da vulnerabilidade, proposto por Aller et al. (1987). A presente área de estudos, compreende uma região em que o SAG encontra-se, em sua maior parte, aflorante, exigindo maior atenção e preocupação com os usos e coberturas da terra instalados, os quais possam potencializar a contaminação e a poluição do aquífero.

O mapeamento da vulnerabilidade foi delineado mediante técnicas de geoprocessamento, análise e integração de mapas temáticos em SIG, com vistas à proposição de medidas mitigadoras que propiciem a melhor proteção das áreas de recarga do aquífero, colaborando para o gerenciamento dos recursos hídricos, crescimento e ordenamento territorial da cidade de Ribeirão Bonito.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O SAG apresenta em suas bordas, áreas consideradas naturalmente vulneráveis, nas quais ocorrem a recarga direta. A geologia da área de estudos tem suas características compatíveis com o conjunto do SAG, incluindo rochas do Cretáceo (Serra Geral), Jurássico (Botucatu), Triássico (Pirambóia) e Neógeno (sedimentos aluvionares), em um sistema estratificado, numa sequência que inclui o próprio SAG.

Segundo Rabelo (2006), a espessura do SAG no município atinge valores entre 132 e

270 m. Para bacias hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, os valores variam entre 95 a 270 m, obtendo um valor médio de 187 m.

Conforme o relatório do IPT (2000), os sedimentos arenosos da Formação Pirambóia afloram na área da Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos – do Tietê-Jacaré (UGRHI – TJ), principalmente na região de Ribeirão Bonito, em duas manchas principais, ao longo das sub-bacias do Baixo e Médio Jacaré-Guaçu.

A UGRHI-TJ engloba as sub-bacias de três rios principais: Tietê, Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. O município de Ribeirão Bonito encontra-se inserido em partes do Alto Jacaré-Pepira e baixo, médio e alto Jacaré-Guaçu, localizado em sua maior extensão, em áreas de afloramento do SAG.

Devido a sua localização em área de recarga do SAG, foi definida como área de estudos, o município de Ribeirão Bonito, região central do Estado de São Paulo, como pode ser constatado na Figura 1.

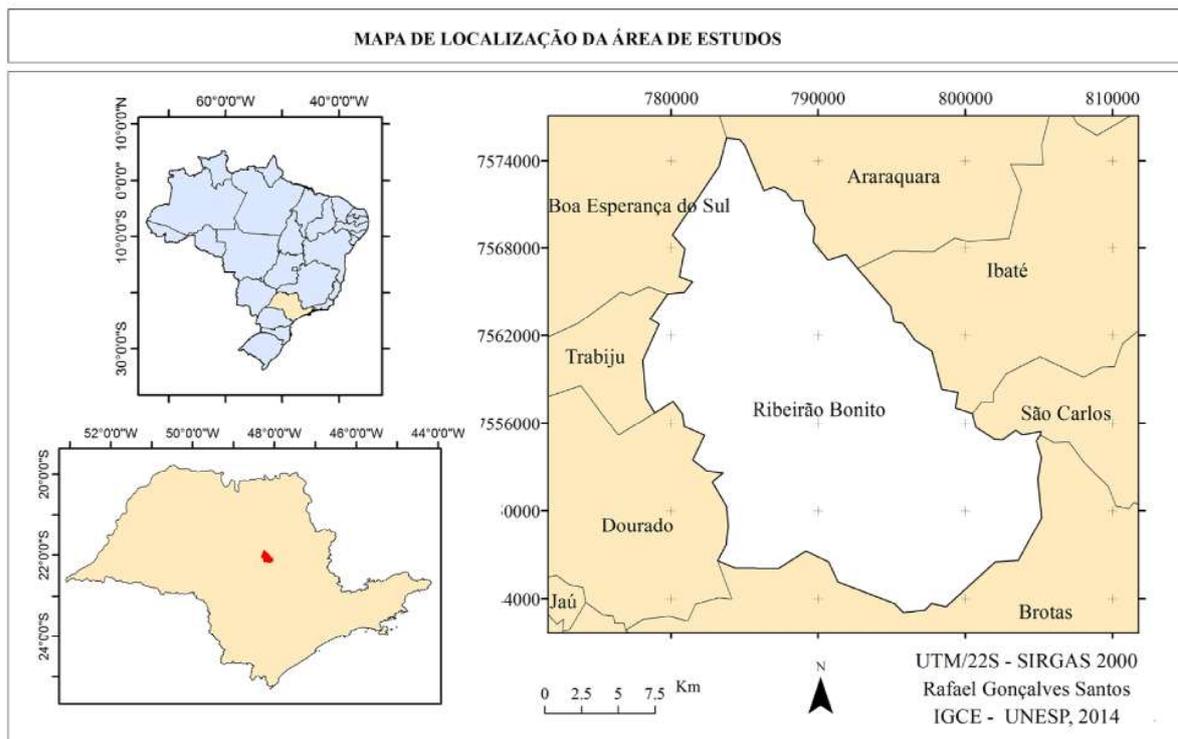


Fig. 1 - Localização da área de estudo em Ribeirão Bonito - SP.

## BASES TEÓRICO-CONCEITUAIS

Os estudos relacionados ao mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos têm sido extensivamente utilizados em todo mundo para dar

suporte ao ordenamento do território. O conceito de vulnerabilidade de aquíferos é segundo Hirata e Ferreira (2001), inicialmente utilizado por Le Grand (1964), nos EUA. Posteriormente

vários sistemas de avaliação e de mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos foram desenvolvidos como, por exemplo, Albinet e Margat (1970), Haertle (1983) apud Lobo Ferreira e Cabral (1991), Aller *et al.* (1987), Foster (1987), Foster e Hirata (1988) e Oliveira e Lobo Ferreira (2004).

Estes métodos podem ser agrupados em 3 categorias (NATIONAL RESEARCH CONCIL, 1993, apud NOBRE *et al.*, 2007): (1) Métodos de índices e sobreposição, (2) os modelos baseados em processos e (3) os métodos estatísticos. Dentre os métodos de índices e sobreposição mais utilizados, dois ganharam destaque na análise da vulnerabilidade de aquíferos: o método GOD (FOSTER, 1987; FOSTER e HIRATA, 1988) e o método DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987). O Índice DRASTIC foi desenvolvido na década de 1980, pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA – *United States Environmental Protection Agency*), com o intuito de avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, procurando sistematizar a determinação potencial do poluente em alcançar a zona saturada, levando em consideração 7 parâmetros em sua avaliação conforme descrito por Aller *et al.* (1987).

Por ser um método paramétrico bastante completo, este índice têm sido amplamente aceito e aplicado como uma ferramenta para auxiliar as decisões políticas relativas à proteção das águas subterrâneas contra a poluição, principalmente nos EUA de acordo com os trabalhos de Durnford *et al.* (1990), Evans e Myers (1990), Halliday e Wolfe (1991), Rundquist *et al.* (1991), Fritch *et al.* (2000), assim como em outras regiões do globo, presente nos trabalhos de Kalinski *et al.* (1994), Engel *et al.* (1996), Lobo-Ferreira e Oliveira (1997), Lynch *et al.* (1997), Melloul e Collin (1998), Johansson *et al.* (1999), Zabet (2002), Melo Junior (2002), Al-Adamat *et al.* (2003), Lobo Ferreira & Oliveira (2004), Babiker *et al.* (2005), Nobre (2006), Bastida *et al.* (2009), Marquezan *et al.*, (2010) e Huan *et al.* (2012).

O índice DRASTIC corresponde à soma ponderada de sete valores relacionados aos seguintes indicadores hidrogeológicos como mostra a Figura 2. Para cada parâmetro DRASTIC, Aller *et al.*, (1987), determinaram um peso relativo que varia entre 1 e 5, sendo o peso 5 inferido para o fator mais significativo e 1 para o menos importante. A cada variável inserida nos

parâmetros do DRASTIC é inferida uma carga que varia entre 1 a 10 conforme o Quadro 1.

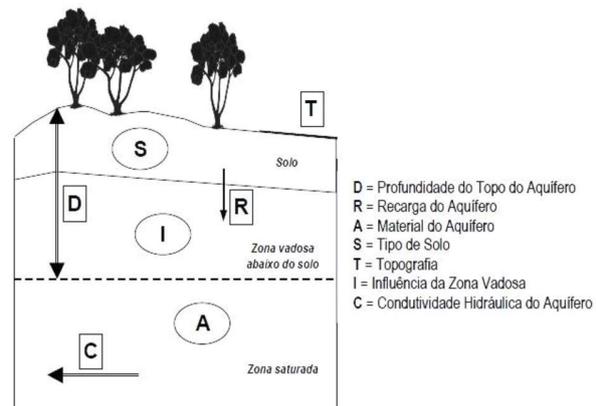


Fig. 2 - Parâmetros utilizados no método DRASTIC. Fonte: Oliveira e Lobo Ferreira (2004).

A cartografia de vulnerabilidade de aquíferos por meio das técnicas de geoprocessamento e análise em SIG, tem revolucionado o procedimento de elaboração de mapas de vulnerabilidade à poluição de aquíferos, reduzindo o tempo de elaboração, aprimorando a definição das classes de vulnerabilidade, permitindo ainda manipular, analisar, e incorporar dados com uma componente espacial, tais como dados geológicos e hidrogeológicos (SHIRAZI *et al.*, 2012). Trabalhos como os de Merchant (1994), Napolitano (1996), Fritch *et al.* (2000), Babiker *et al.* (2005), Panagopoulos *et al.*, (2006), Antonakos e Lambrakis (2007), Meneses (2007), Rahman (2008), Bojórquez-Tapia *et al.*, (2009), Voudouris *et al.* (2010), Mota Pais *et al.* (2012), Sener e Davraz (2013), Neshat *et al.* (2014) e Kazakis e Voudouris (2015), são exemplos da utilização dos SIG na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos com base no Índice DRASTIC, mostrando o potencial da ferramenta para estudos desta natureza.

#### 4. METODOLOGIA

Com base a multiplicação entre os pesos dos índices intermediários (constantes) DRASTIC, e as cargas individuais (variáveis) de cada parâmetro, obtém-se o Índice Final DRASTIC, de acordo com a Equação (1).

$$\text{DRASTIC} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c \quad (1)$$

onde,  $D_p$ ,  $R_p$ ,  $A_p$ ,  $S_p$ ,  $T_p$ ,  $I_p$ ,  $C_p$  correspondem aos pesos dos fatores DRASTIC que não

Quadro 1: Parâmetros e variáveis do DRASTIC

Parâmetros/Peso	Variáveis	Cargas
Profundidade da Zona Insaturada (m)/ 5	0 – 1,5	10
	1,5 – 4,5	9
	4,5 – 9,0	7
	9,0 – 15,0	5
	15,0 – 22,0	3
	22,5 – 30,0	2
Recarga (mm/ano)/ 4	>30,0	1
	< 51	1
	51 – 102	3
	102 -178	6
	178 – 254	8
Material do Aquífero/ 3	> 254	9
	Folhelho maciço	1 – 3
	Ígneas/metamórficas	2 – 5
	Ígneas/metamórficas intemperizadas	3 – 5
	Till glacial	4 – 6
	Arenito, calcário e folhelho sequencial	5 – 9
	Arenito maciço	4 – 9
	Calcário maciço	4 – 9
	Areia e cascalho	4 – 9
	Basalto	2 – 10
Tipo de Solo/ 2	Calcário cárstico	9 – 10
	Fino ou ausente	10
	Cascalho	10
	Arenoso	9
	Turfoso	8
	Argila agregada e/ou contraída	7
	Marga arenosa	6
	Marga	5
	Silte margoso	4
	Argila margosa	3
	Lixo/esterco	2
	Argila desagregada e não expansível	1
	Topografia ou Inclinação do relevo (%)/ 1	0 – 1
1 – 6		9
6 – 12		5
12 – 18		3
> 18		1
Impacto da Zona Insaturada/ 5	Camada confinante	1
	Argila/ silte	2 – 6
	Xisto argiloso, argilito	2 – 5
	Calcário	2 – 7
	Arenito	4 – 8
	Arenito, calcário e argilito estratificados	4 – 8
	Areia e cascalho com significativo silte e argila	4 – 8
	Rocha metamórfica/ ígnea	2 – 8
	Areia e cascalho	6 – 9
Condutividade Hidráulica (m/dia)/ 3	Basalto	2 – 10
	0 – 4,1	1
	4,1 – 12,2	2
	12,2 – 28,5	4
	28,5 – 40,7	6
	40,7 – 81,5	8
	> 81,5	10

podem ser modificados, e  $D_c$ ,  $R_c$ ,  $A_c$ ,  $S_c$ ,  $T_c$ ,  $I_c$ ,  $C_c$  correspondem aos fatores de carga das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência, cujo valor varia de acordo com o nível identificado pelo usuário do método.

Para representação cartográfica do índice de vulnerabilidade DRASTIC, este estudo utilizou a escala de cores apresentada por Struckmeier e Margat (1995) apud Melo Junior (2008), cujos valores de baixa vulnerabilidade

são representados pela cor verde; vulnerabilidade média pela cor amarela, alta vulnerabilidade com coloração rosa e vulnerabilidade muito alta representada por vermelho (Figura 3).

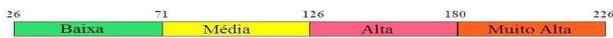


Fig. 3 - Escala de Vulnerabilidade DRASTIC. Fonte: Melo Junior (2008).

Segundo Melo Junior (op. cit.), os valores limite de vulnerabilidade 26 e 226 representam índices de vulnerabilidade incipiente e extrema, respectivamente. Entre este intervalo, valores

de vulnerabilidade obtidos entre 26 e 71 são considerados baixos; entre 71 a 126 a vulnerabilidade é média; entre 126 e 180 a vulnerabilidade é considerada alta; e, valores localizados entre 180 e 226 representam uma vulnerabilidade muito alta.

Os mapas temáticos correspondentes aos parâmetros DRASTIC a serem analisados, constituem uma importante etapa na análise da vulnerabilidade. A Figura 4 ilustra o fluxograma das etapas desenvolvidas neste estudo relacionado à integração de dados em SIG, para elaboração do mapeamento do índice DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*.

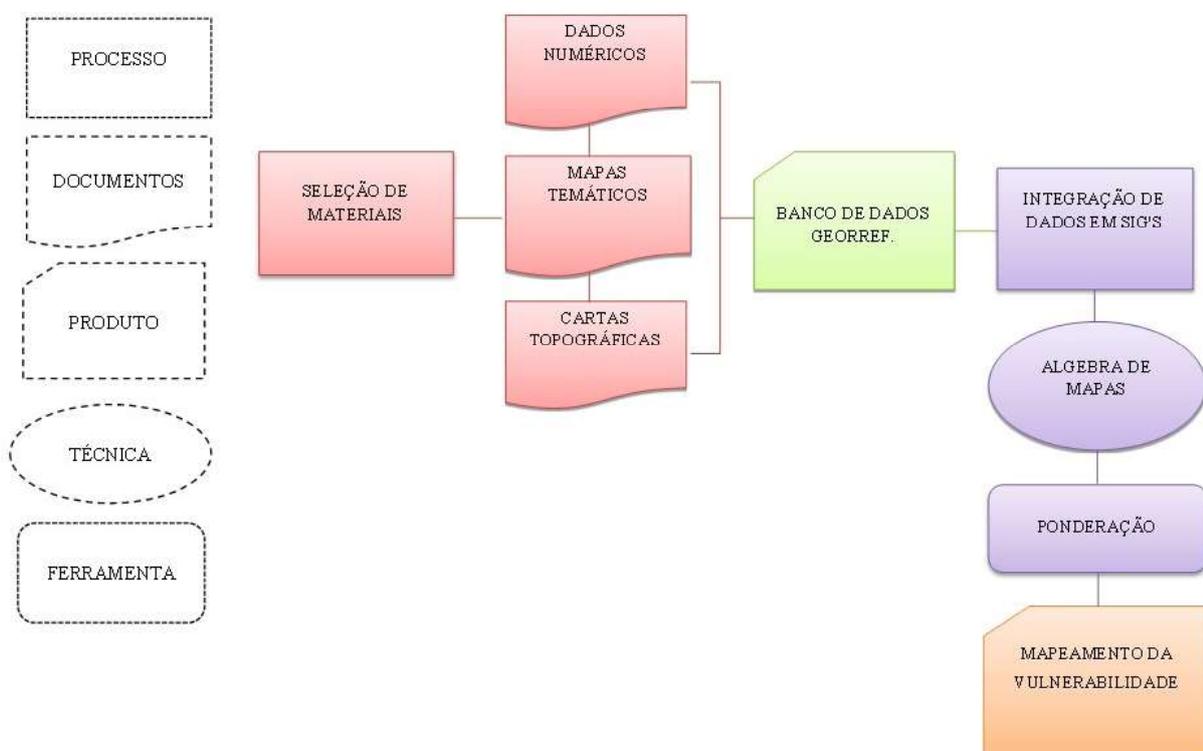


Fig. 4 - Fluxograma dos procedimentos metodológicos para o DRASTIC.

Criou-se o banco de dados georreferenciado, o qual foi posteriormente integrado e manipulado em SIG. Para confecção dos mapas correspondentes aos parâmetros DRASTIC, foram utilizadas bases cartográficas de diferentes trabalhos, como: Rabelo (2006), Queluz e Sturaro (2011) e IPT (2000). Após mapear os parâmetros a serem analisados, uma importante etapa se faz com a interpolação dos mapas, mediante à inferência de pesos e cargas a serem ponderados. Os índices correspondentes a cada parâmetro da metodologia DRASTIC foram adaptados à realidade da área de estudo (Quadro

2). Os parâmetros e suas respectivas fontes são mostrados na Tabela 1.

Mediante a multiplicação entre os pesos dos parâmetros (constantes) DRASTIC e as cargas individuais das variáveis que compõem os parâmetros, foi elaborada a equação da área de estudos de acordo com a Equação 2.

$$\text{DRASTIC} = 5 \times \frac{10}{3} + 4 \times \frac{38}{5} + 3 \times \frac{12}{2} + 2 \times \frac{36}{6} + 1 \times \frac{28}{5} + 5 \times \frac{26}{5} + 3 \times \frac{19}{2} \quad (2)$$

Obteve-se o Índice Final DRASTIC sendo responsável também, pela composição da escala de vulnerabilidade proposta. A mesma equação

Quadro 2: Parâmetros DRASTIC da Área de Estudos

Parâmetros	Variáveis	Carga
Profundidade da Zona Insaturada (m)	0 – 23	7
	23 – 35	2
	> 35	1
Recarga (mm/ano)	Formação Botucatu 465 (> 254)	9
	Formação Pirambóia 465 (> 254)	9
	Sedimentos Aluvionares 305 (> 254)	9
	Formação Serra Geral 215 (178 – 254)	8
	Formação Adamantina 75 (51 – 102)	3
Material do Aquífero	Formação Botucatu (Arenito maciço)	9
	Formação Pirambóia (Arenito maciço)	9
Tipo de Solo	Areias Quartzosas Distróficas	9
	Latossolo Roxo Distrófico	3
	Latossolo Vermelho Amarelo Álico	6
	Latossolo Vermelho Escuro Álico	6
	Podzólico Vermelho Amarelo Álico	5
	Solos Litólicos Eutróficos e Distróficos	7
Topografia ou Inclinação do relevo (%)	0 – 1	10
	1 – 6	9
	6 – 12	5
	12 – 18	3
	> 18	1
Impacto da Zona Insaturada	Sedimentos Aluvionares	8
	Formação Botucatu	8
	Formação Pirambóia	8
	Formação Serra Geral	1
	Formação Adamantina	1
Condutividade Hidráulica (m/dia)	0,58 – 1,53	10
	1,53 – 3,4	9

Tabela 1: Fontes dos dados para elaboração do DRASTIC

Parâmetros	Fonte
<b>D</b> Profundidade da Zona Insaturada	Queluz e Sturaro (2011)
<b>R</b> Taxa de recarga	Rabelo (2006)
<b>A</b> Material do Aquífero	IPT (2000)
<b>S</b> Tipos de Solos	IPT (2000)
<b>T</b> Topografia	Imagem SRTM
<b>I</b> Impacto na Zona Insaturada	IPT (2000)
<b>C</b> Condutividade Hidráulica	Queluz e Sturaro (2011)

foi elaborada para o somatório dos pesos e cargas do DRASTIC *Pesticida* (Equação 3).

$$Pesticida = 5 \times \frac{10}{3} + 4 \times \frac{38}{5} + 3 \times \frac{12}{2} + 5 \times \frac{36}{6} + 3 \times \frac{28}{5} + 4 \times \frac{26}{5} + 2 \times \frac{19}{2} \quad (3)$$

#### 4.1 Álgebra de Mapas - Análise Multicritério

A última etapa executada neste estudo realizou-se por meio da sobreposição dos mapas referente aos parâmetros da metodologia DRASTIC, os quais foram ponderados com seus respectivos pesos e cargas, baseada na técnica de análise multicriterial ponderada, utilizada em casos que se têm diferentes cargas e pesos para os parâmetros e variáveis que contribuem para a ocorrência de um determinado processo.

A ponderação é uma operação pontual da álgebra de mapas, sendo uma das técnicas mais utilizadas a análise multicriterial ponderada. Segundo Ferreira *et al.* (2008), é uma técnica de modelagem de dado espacial que permite agregar diferentes fontes de informação e estimar a probabilidade de um fenômeno ocorrer, sendo chamada por Eastman (1999) de modelagem por peso de evidência e por Bonham-Carter (1994) de superposição de mapas com múltiplas classes.

A metodologia DRASTIC tem como principal objetivo produzir uma informação única, sendo, portanto, utilizada a ferramenta *Weighted Overlay* em Análise Espacial (Spatial Analyst Tools) do *ArcGis 10.1* para finalização e elaboração do mapa de vulnerabilidade da área de estudos.

A ferramenta *Weighted Overlay* é utilizada em casos de cruzamento de mapas, a partir de pesos estabelecidos pelo usuário, viabilizando assim a Análise Multicriterial Ponderada (Weighted Overlay). Para geração do mapa de índice de vulnerabilidade DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, foram calculados os valores referentes à porcentagem que cada parâmetro representa na ponderação com base na ferramenta *Weighted Overlay*, representados na Tabela 2 e 3.

Tabela 2: DRASTIC e percentuais de ponderação no *ArcGis 10.1*

Parâmetro	Valor	Real (%)	Weighted Overlay (%)
D	5	21,73	22
R	4	17,40	17
A	3	13,05	13
S	2	8,70	9
T	1	4,34	4
I	5	21,73	22
C	3	13,05	13
TOTAL	23	100	100

Tabela 3: DRASTIC *Pesticida* percentuais de ponderação no *ArcGis 10.1*

Parâmetros	Valor	Real (%)	Weighted Overlay (%)
D	5	19,23	19
R	4	15,38	15
A	3	11,53	12
S	5	19,23	19
T	3	11,53	12
I	4	15,38	15
C	2	7,72	8
TOTAL	26	100	100

## 5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Para o estabelecimento das classes de vulnerabilidade, seguiu-se o procedimento proposto no método DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987). Como produto resultou os valores que indicam as classes de vulnerabilidade do aquífero, conforme valores fixados, assim estipulados.

Os dados referentes aos dois índices foram então compilados para o SIG *ArcGis 10.1*, para que o software realiza-se a ponderação e espacialização das classes de vulnerabilidade mediante o uso da ferramenta *Weighted Overlay*. Os valores referentes ao cálculo do somatório do índice DRASTIC são apresentados na Tabela 4, e espacializados na Figura 5.

Tabela 4: Valores da ponderação do DRASTIC

Parâmetro	$\Sigma$	Classes	Média	Pesos	Resultado
D	10	3	3,3	5	16,6
R	38	5	7,6	4	30,4
A	12	2	6	3	18
S	36	6	6	2	12
T	28	5	5,6	1	5,6
I	26	5	5,2	5	26
C	19	2	9,5	3	28,5
Total =					137,1

Após se multiplicar os pesos dos parâmetros intermediários pelas cargas das variáveis, verificou-se que o índice final DRASTIC variou de 26–137,1. Segundo a escala de vulnerabilidade DRASTIC, os valores correspondem à baixa, média e alta vulnerabilidade. Os valores obtidos até 71 são considerados baixos; entre 71 e 126 a vulnerabilidade é considerada média; entre 126 e 180 a vulnerabilidade é considerada alta. Os resultados do mapeamento DRASTIC referente aos percentuais em cada quilômetro quadrado para cada classe são representados na Tabela 5.

Tabela 5: Índice DRASTIC

Classes	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentagem (%)
Alta	262,4	55,5
Média	168,4	35,6
Baixa	41,3	9,0
Total	472,1	100

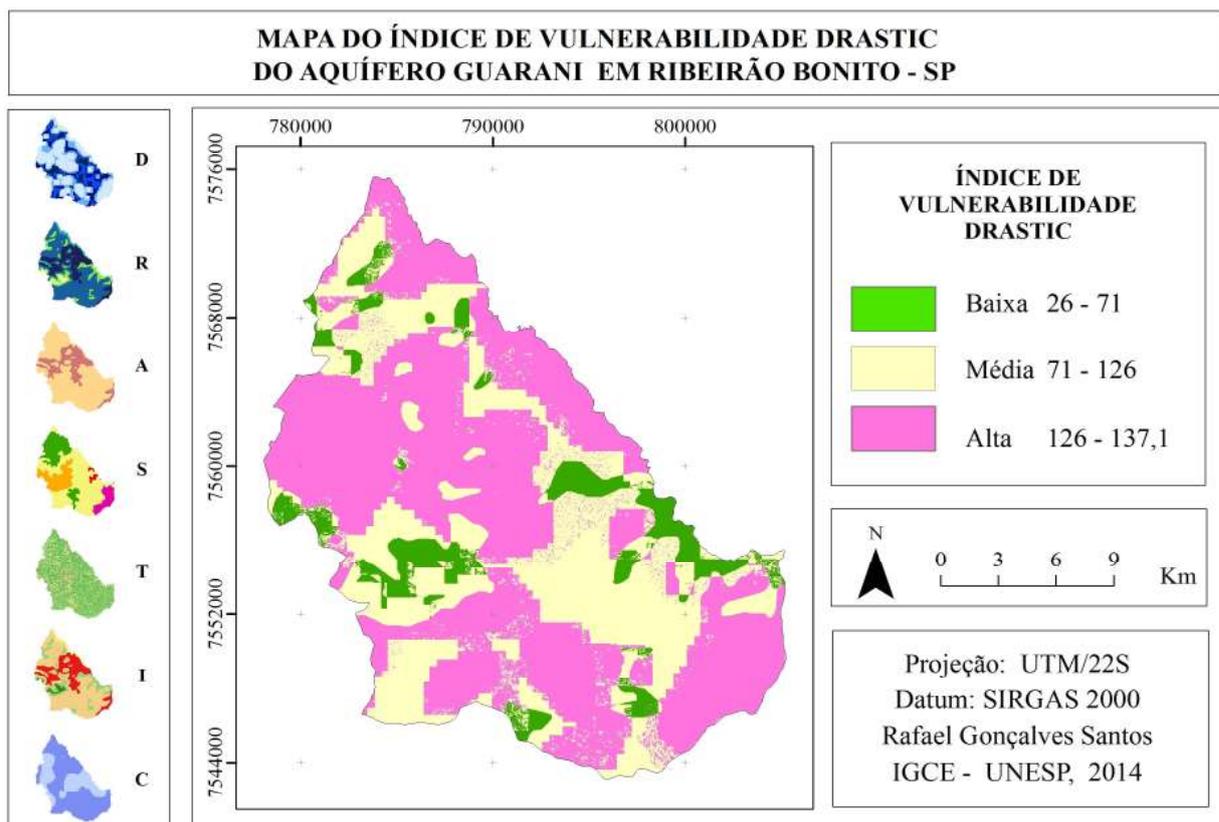


Fig. 5 – Vulnerabilidade do SAG no Município de Ribeirão Bonito.

### 5.1 DRASTIC *Pesticida*

Assim como no método DRASTIC, os dados foram então copilados para o SIG *ArcGis 10.1*, para ponderação e espacialização das classes de vulnerabilidade mediante o uso da ferramenta *Weighted Overlay*. A aplicação do índice *Pesticida* foi necessária, uma vez que a área de estudos localiza-se, em sua maioria, sob áreas agrícolas, sendo estas, as principais fontes de poluição potencial. Os valores referentes ao cálculo do somatório do índice DRASTIC *Pesticida* são espacializados na Figura 6 e apresentados na Tabela 6.

De acordo com a metodologia DRASTIC *Pesticida*, proposta por Aller *et al.* (1987), a presente área de estudos apresentou índices de vulnerabilidade compreendidos entre o intervalo de 26 – 151,6, subdivididos nas seguintes classes: baixa (< 71), média (71 - 126) e alta vulnerabilidade (126 - 180). Os resultados do mapeamento da vulnerabilidade são mostrados na Figura 6, e os percentuais em quilômetro quadrado de cada classe são expressos na Tabela 7.

Tabela 6: Valores da ponderação do DRASTIC *Pesticida*

Parâmetro	$\Sigma$	Classes	Média	Pesos	Resultado
D	10	3	3,3	5	16,6
R	38	5	7,6	4	30,4
A	12	2	6	3	18
S	36	6	6	5	30
T	28	5	5,6	3	16,8
I	26	5	5,2	4	20,8
C	19	2	9,5	2	19
Total =					151,6

Tabela 7: Índice DRASTIC *Pesticida*

Classes	Área (Km <sup>2</sup> )	Porcentagem (%)
Alta	284,5	60,3
Média	142,8	30,2
Baixa	44,8	9,5
Total	472,1	100

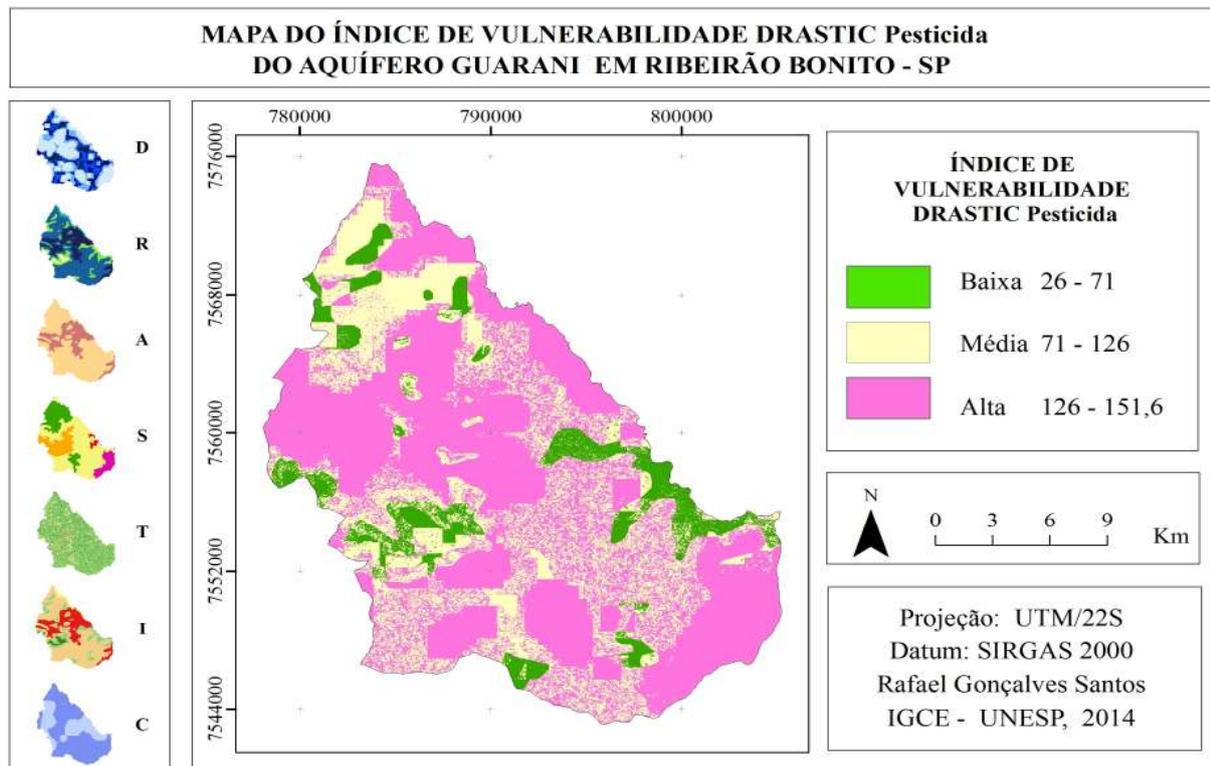


Fig. 6 - Vulnerabilidade de Ribeirão Bonito, segundo o índice DRASTIC *Pesticida*.

## 6. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A espacialização dos resultados pode ser uma fonte de informações para a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos em áreas de afloramento do SAG. Este estudo objetivou mapear a vulnerabilidade do SAG em Ribeirão Bonito, em escala 1: 200.000, aplicável para todo o limite do município. O mapeamento do índice de vulnerabilidade do SAG, baseado nos índices DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, apresentou alta vulnerabilidade frente à poluição potencial em ambas as análises, correspondendo a mais da metade do município. Os resultados apontam que, as áreas com alta vulnerabilidade, correspondem na metodologia do índice DRASTIC ao total de 262,4 Km<sup>2</sup> e 55,5% do município. Verificou-se o aumento das áreas altamente vulneráveis, quando mapeadas segundo o índice DRASTIC *Pesticida*, elevando ao total de 284,5 Km<sup>2</sup> ou 60,3 %.

A classe correspondente aos altos índices de vulnerabilidade (126 - 180) compreende as áreas situadas totalmente em áreas de afloramento do SAG, não apresentando camadas confinantes, localizadas principalmente sobre sedimentos aluvionares, diferenciando essa classe da classe de média vulnerabilidade. Verifica-se que as principais litologias correspondem aos arenitos

finos e médios das Formações Pirambóia e Botucatu, as quais apresentam condutividade hidráulica variando entre média a alta (valores entre 1,53 – 3,4 m/d), e as maiores taxas recarga do município (465 mm/ano).

Caracterizada como localidades situadas em sua maioria, sob superfícies suaves com baixo percentual de declives (0 – 6%), as áreas com alta vulnerabilidade, apresentam uma espessura da zona insaturada, compreendida entre 0 e 35 m e solos do tipo latossolo vermelho amarelo álico, areias quartzosas distróficas e solos litólicos eutróficos e distróficos.

A classe correspondente aos médios índices de vulnerabilidade (71 - 126) representam 168,4 Km<sup>2</sup>, correspondendo a 35,6% do município, segundo o índice DRASTIC. A mesma classe no mapeamento do índice DRASTIC *Pesticida*, teve seu valor reduzido para 142,8 Km<sup>2</sup> e 30,2% da área. Compreendem as áreas situadas parcialmente em áreas de afloramento e principalmente, em áreas onde o SAG encontra-se confinado pelos sucessivos derrames basálticos do período Cretáceo, provenientes da Formação Serra Geral e em menor proporção os arenitos das Formação Adamantina.

Abaixo da zona insaturada, verifica-se

que as principais litologias correspondem às Formações do período Triássico (Formação Pirambóia) e do Jurássico (Formação Botucatu) compreendidas por arenitos finos e médios. Devido às características geológicas, as áreas com médios índices de vulnerabilidade apresentam uma condutividade hidráulica compreendida entre valores de média/alta (1,53 – 3,4 m/d) e uma média taxa recarga (215 - 465 mm/ano).

Constata-se que essas localidades situam-se, em sua maioria, sob superfícies pouco inclinadas, apresentando uma média declividade (valores entre 6 e 12%) e uma espessura da zona insaturada variando entre 35 e 62 m. Os solos presentes são classificados como Latossolo Vermelho Amarelo álico e solos litólicos eutróficos e distróficos, provenientes dos arenitos finos e médios das Formações Pirambóia e Botucatu.

As localidades correspondentes às áreas de baixa vulnerabilidade representam um total de 41,3 Km<sup>2</sup>, ou 9,0% no mapeamento do índice DRASTIC, havendo uma pequena elevação para 44,8 Km<sup>2</sup> e 9,5%, quando comparado ao índice DRASTIC Pesticida. Situadas principalmente em superfícies mais íngremes com declividade variando entre 12 e mais de 18%, as áreas pouco vulneráveis, apresentam forte presença de latossolos roxos distróficos, solos litólicos eutróficos e latossolos distróficos vermelho amarelo álico.

A pedologia das localidades situadas em áreas com baixa vulnerabilidade é influenciada diretamente pela litologia da região, uma vez que, tais áreas encontram-se situadas onde o SAG é confinado por sucessivos derrames basálticos do Cretáceo, referente à Formação Serra Geral e também aos arenitos finos e muito finos da Formação Adamantina.

Verifica-se que as características litológicas e pedológicas atuam diretamente na taxa de recarga, sendo a menor verificada dentre as classes de vulnerabilidade (51 - 254 mm/ano), assim como influenciam na condutividade hidráulica, apresentando aos menores índices, variando entre 0,58 a 1,53 m/d. Constata-se que essas características hidrogeológicas, corroboram para que essas regiões apresentem os mais baixos índices de vulnerabilidade.

Quando comparados os mapas referentes às duas metodologias empregadas, verifica-

se que o índice *Pesticida* permite o maior detalhamento das áreas vulneráveis, devido ao menor peso atribuído aos parâmetros, Impacto da Zona não-Saturada e Condutividade Hidráulica, os quais representam suas classes em grandes áreas. O maior peso atribuído na ponderação os parâmetros Solo e Topografia permitiu exercer assim maior influência, indicando serem fundamentais para análises em ambientes agrícolas, realçando áreas mais vulneráveis até não detectadas no método DRASTIC original, as quais eram classificadas apenas com média vulnerabilidade.

Conforme a análise de Meneses (2007), pode-se através da utilização de mapas de vulnerabilidade definir as áreas em que o monitoramento deva ser executado de maneira mais intensiva, bem como, auxiliar no planejamento de práticas conservacionistas, com vistas à definição de áreas que devam ser protegidas de modo a garantir a integridade do aquífero em termos de qualidade da água.

## CONCLUSÃO

Mapas de vulnerabilidade tem se apresentado como excelentes ferramentas para proteção das águas subterrâneas e monitoramento da vulnerabilidade de aquíferos, por este motivo, diversos métodos foram desenvolvidos nas últimas décadas, tais como o método Surface Impoundment Assessment, GOD, AVI (*Aquifer Vulnerability Index*), SINTAC dentre outros, sendo o modelo DRASTIC, desenvolvido por Aller *et al.* (1987), amplamente difundido e conhecido nas geociências, sobretudo no Brasil.

A análise e integração de dados em SIG apresentou diversas vantagens, que incluem, desde benefício da integração de técnicas de processamento digital na elaboração de uma informação única, ao uso potencial do produto final óbito referente ao mapeamento vulnerabilidade do SAG, com vistas ao planejamento e ordenamento do território em Ribeirão Bonito, de modo a melhor conhecer as áreas propícias à implantação de atividades socioeconômicas.

A técnica de análise multicriterial ponderada permitiu produzir uma informação única, eficiente em casos que se têm diferentes pesos e cargas que contribuem para a ocorrência de um determinado processo, como ocorrido

com a metodologia DRASTIC. A análise dos índices DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, apresentou resultados semelhantes em termos de configuração dos limites entre as classes de vulnerabilidade. Constatou-se que o SAG no município de Ribeirão Bonito, apresentou índices de baixa, média e alta vulnerabilidade, com predomínio de áreas altamente vulneráveis, porém, não havendo casos vulnerabilidade extrema.

Verificou-se que a presença de áreas altamente vulneráveis concentra-se principalmente em áreas de afloramento do SAG, caracterizadas pela presença de litologias correspondente aos arenitos finos e médios das formações Pirambóia e Botucatu, as quais apresentam pequena espessura da zona não saturada, solos arenosos, áreas de baixo declive, alta condutividade hidráulica e as maiores taxas recarga do município.

As localidades com alta vulnerabilidade devem ser continuamente monitoradas, buscando melhorias no planejamento dos usos e coberturas da terra presentes, devido ao potencial de poluição que trazem à qualidade das águas subterrâneas. Ressalta-se que, quando comparados aos estudos de vulnerabilidade do SAG, elaborados por Albuquerque Filho *et al.* (2012), através do método GOD, Queluz e Sturaro (2011), mediante o índice AVI, realizados na UGRHI – TJ (Unidade Hidrográfica de Gerenciamento de Recursos Hídricos - do Tietê-Jacaré), em ambas análises, o município de Ribeirão Bonito, também localiza-se densamente sobre terrenos altamente vulneráveis.

O mapeamento e análise da vulnerabilidade do SAG, por meio dos métodos DRASTIC e DRASTIC *Pesticida*, possibilita subsidiar a otimização e a implantação dos futuros usos e coberturas da terra no município, objetivando minimizar a potencial poluição, gerando impacto ambiental de menor proporção nas áreas com alta vulnerabilidade. Os índices de vulnerabilidade de aquíferos servem como ferramenta na gestão municipal, auxiliando no zoneamento do uso da terra e na definição de áreas aptas para instalação de atividades com maior potencial de poluição, diminuindo os riscos de poluição do aquífero.

Propõe-se com base na realização deste estudo, que o município de Ribeirão Bonito atente-se aos usos e coberturas da terra instalados nas áreas mais vulneráveis e utilize esse

estudo como instrumento de ordenamento territorial e gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos com vistas à proteção do SAG e contribuindo para a preservação ambiental e a manutenção da qualidade de vida da população.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ADAMAT R.A.N., FOSTER I.D.L., BABAN S.M.J. Groundwater vulnerability and risk mapping for the Basaltic aquifer of the Azraq basin of Jordan using GIS, Remote sensing and DRASTIC. *Applied Geography*, 23: 303–324p. 2003.

ALBERTI, E. A.; SILVA, J.L. S. Da. Estudo da Vulnerabilidade Natural dos Aquíferos no Perímetro Urbano de Tupan-ciretã/RS. In: **1º Simpósio de Recursos Hídricos do Sul**. Santa Maria. RS, Anais. 19p. 2005(CD-rom).

ALBINET, M.; MARGAT, J. **Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine**. Bull BRGM 2me Series 3 (4):13-22p. 1970.

ALBUQUERQUE FILHO, J.L; CARVALHO, A. M.; BARBOSA, M.C.; IKEMATSU, P.; MONTEIRO, A.C.M.C. **Sistema aquífero Guarani: subsídios ao plano de desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do sistema aquífero Guarani no Estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo, v. 1: 102 p. 2011.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. **DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings**. U.S. EPA, Report 600/2-85/018. 1987.

ANTONAKOS A.K; LAMBRAKIS N.J. Development and testing of three hybrid methods for the assessment of aquifer vulnerability to nitrates, based on the DRASTIC model, an example from NE Korinthia, Greece. **J Hydrol**, 333:288–304p, 2007. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.08.014

BABIKER, I. S.; MOHAMED, M. A. A.; HIYAMA, T.; KATO, K.A. GIS based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. **Science of the Total Environment**, v. 345: 127-140p. 2005.

- BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic information systems for geoscientists, modeling with GIS**. Ontario: Pergamon, 398p. 1994.
- BOJÓRQUEZ-TAPIA, L. A.; CRUZ-BELLO, G. M.; LUNA-GONZÁLEZ, L.; JUÁREZ, L.; ORTIZ-PÉREZ, A. V-DRASTIC: Using visualization to engage policymakers in groundwater vulnerability assessment. **Journal of Hydrology**, v. 373: 242-255p. 2009.
- BORGHETTI, N.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E.F.F. **Aquífero Guarani – A verdadeira integração dos países do Mercosul**. Curitiba, 2004.
- BORGHETTI, N. R. Boscardin; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. **Aquífero Guarani: a verdadeira integração dos países do MERCOSUL**. Curitiba: Ed. dos Autores, 214p. 2004.
- CETESB. **Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo – 1997**. São Paulo: CETESB, 106p. 1997.
- DURNFORD, D.S., THOMPSON, K.R., ELLERBROOK, D.A., LOFTIS, J.C.; DAVIES, G.S. **Screening methods for groundwater pollution potential from pesticides use in Colorado agriculture: Colorado Water Resources research institute**. Fort Collins, Completion Report: 156-165 p. 1990.
- EASTMAN, J. L. **Analysis of the effects of CO<sub>2</sub> and landscape change using a coupled plant meteorological model**. Fort Collins, Ph.D. Dissertation, Department of Atmospheric Science, Colorado State University. 148p. 1999.
- ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS Desktop 10.1**. Redlands, California, USA, 2011.
- ENGEL B.; NAVULAR K.; COOPER B.L. Estimating groundwater vulnerability to non-point source pollution from Nitrates and Pesticides on a Regional Scale. **International Association of Hydrological Science**, 235: 521-526p. 1996.
- EVANS, B.M., MYERS, W.L. A GIS-based approach to evaluating regional groundwater pollution potential with DRASTIC. **Journal of Soil Water Conservation**, 45: 242-245p. 1990.
- FERREIRA, M. V.; RIEDEL, P. S.; LOPES, E. S. S.; MERINO, E. R. Comparação entre diferentes critérios para elaboração de mapas de suscetibilidade aos escorregamentos. Exemplo do município de Cubatão, serra do mar paulista. **Revista Brasileira de Cartografia**, 60/04: 385-400 p. 2008. (ISSN 1808-0936). Disponível em: <<http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/340/330>> cesso em: 22 junho 2014.
- FOSTER, S. S. D. **Fundamental Concepts in Aquifer Vulnerability Pollution Risk and Protection Strategy**. Noordwijk, Holanda, 69-86p. 1987.
- FOSTER, S.S.D., HIRATA, R.C.A. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. Lima: **World Health Organization, Pan American Health Organization, Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences**. Technical Report: 78p, 1988.
- FOSTER, S. HIRATA, R. C. A. Determinação de Riscos de Contaminação das Águas Subterrâneas, São Paulo. **Bol. Inst. Geológico**, São Paulo, n. 10, 1993.
- FRITCH, T.G., MCKNIGHT, C.L., YELDERMAN, JR. J.C., ARNOLD, J.G. An aquifer vulnerability assessment of the Paluxy Aquifer, central Texas, USA, using GIS and a modified DRASTIC approach. **Environment Management**. 25(3): 337–345 p, 2000a.
- GOMES, M.A.F.; FILIZOLA, H.F.; SPADOTTO, C.A.; PEREIRA, A.S. **Caracterização das áreas de afloramento do Aquífero Guarani no Brasil – base para uma proposta de gestão sustentável**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 20 p. 2006.
- HALLIDAY, S.L.; WOLFE, M.L. Assessing ground water pollution potential from nitrogen fertilizer using a geographic information system. **Water Resources Bulletin**, 27: 237-245p. 1991.
- HIRATA, R e SUHOGUSOFF, A.V. A proteção dos recursos hídricos subterrâneos no Estado de São Paulo. **In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, Cuiabá, 15p. 2004.
- HIRATA, R. C. A. E FERREIRA, L. M. R. Os aquíferos da bacia hidrográfica do alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à

- poluição. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 1: 43-50 p. 2001.
- HUAN, H.; WANG, J.; TENG, Y. Assessment and validation of groundwater vulnerability to nitrate based on a modified DRASTIC model: A case study in Jilin City of northeast China. **Science of the Total Environment**, 440: 14-23p. 2012.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de uso da terra. Manuais técnicos em geociências**. 2º ed. Rio de Janeiro, 171p. 2006. Disponível em: <ftp://geofitp.ibge.gov.br/documentos/recursosnaturais/usodaterra/manualusodaterra.pdf>. Acesso em: 10 maio 2014.
- IPT 2010. **Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e estabelecimento de diretrizes técnicas para a elaboração do Plano da Bacia Hidrográfica do Tietê/Jacaré**. Minuta; relatório 40.674. IPT/Comitê Bacia Tietê/Jacaré. 331p. 2010.
- JOHANSSON, PO.; SCHARP, C.; ALVETEG, T.; CHOZA, A. Framework for ground-water protection-the Managua Ground Water System as an example. **Groundwater**, 37(2): 204–213p. 1999.
- KALINSKI, R.J.; KELLY, W.E.; BOGARDI, I.; EHRMAN, R.L.; YAMAMOTO, P.D. Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells in Nebraska. **Groundwater**, 32, 1: 31-34p. 1994.
- KAZAKIS, N.; VOUDOURIS, K. S. Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: modifying the DRASTIC method using quantitative parameters. **J. Hydrol**, 525: 13–25p. 2015.
- LOBO FERREIRA, J.P.C. 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. 16p. 1998.
- LOBO-FERREIRA, J.P.; CABRAL, M. Proposal for an operational definition of vulnerability of the European community's Atlas of groundwater resources. **Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group**, Brussels, Belgium. 1991.
- LOBO-FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M. DRASTIC groundwater vulnerability mapping of Portugal. In: **Groundwater: An Endangered Resource. Int. Assoc. Hydraul. Research. Proc. 27th IAHR Congress**, Part C: 132-137p. 1997.
- LOBO FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M. Groundwater vulnerability assessment in Portugal. **Geofísica Internacional**. Vol. 43: 541-550p. 2004.
- LYNCH, S. D.; REYNDERS, A. G.; SCHULZE, R. E. **A DRASTIC approach to groundwater vulnerability in South Africa**. 5. Afr. J. Sci. 93, 59. 1997.
- MARQUEZAN, R. G.; CAICEDO, O. L.; BASTO NETO, A. C.; AZAMBUJA FILHO, N. C. Análise da vulnerabilidade do lençol freático à contaminação por hidrocarbonetos em cenário de vazamentos na área do oleoduto Orsul II, Refap-Copesul, RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 15, n. 1: 101-109p. 2010.
- MELLOUL A. J. E.; COLLIN M. A proposed index for aquifer water-quality assessment: the case of Israel's Sharon region. **Journal of environmental management**, 54:131-142p. 1998.
- MELO JUNIOR, H. R. **Mapeamento da vulnerabilidade e análise de risco de contaminação como instrumentos de proteção das águas subterrâneas em áreas industriais: Caso da ALBRAS, Barcarena – PA**. Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências. Dissertação de Mestrado, 154p. 2002.
- MELO JUNIOR, H. R. Método DRASTIC: uma proposta de escala para normatização dos índices finais de vulnerabilidade. **In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, Anais. Natal: ABAS, 11-14 nov. 2008.
- MENESES, L. F. **Avaliação da Vulnerabilidade dos Aquíferos Livres no Município de João Pessoa/ PB, Através do Modelo DRASTIC**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Paraíba. Paraíba – PB. 85p. 2007.
- MENESES, L. F.; SILVA, T. C.; FIGUEIREDO, E. C. T. P.; RAFAEL, R. de A. Evolução urbana e vulnerabilidade dos aquíferos superiores

- no município de João Pessoa-PB. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63 (2). 2011.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (org.) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq, 266p. 2012.
- MERCHANT, J. GIS-based groundwater pollution hazard assessment: a critical review of the DRASTIC model. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, 60 (9): 1117–1127p. 1994.
- MOTA PAIS, M. A. A., ANTUNES, I.M.R.H., ALBUQUERQUE, M.T.D. Vulnerability mapping in a thermal zone, Portugal – a study based on DRASTIC index and GIS, Multi-disciplinary Research on Geographical Information in Europe and Beyond. **Proceedings of the AGILE’2012 International Conference on Geographic Information Science**, Avignon, 24-27p. 2012.
- NAPOLITANO P.; FABBRI A.G. Single-parameter sensitivity analysis for aquifer vulnerability assessment using DRASTIC and SINTACS. **HydroGIS 96: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources Management Proceedings of the Vienna Conference, IAHS**. Publ. n. 235: 559-566p. 1996.
- NESHAT, A.; PRADHAN, B.; DADRAS, M. Groundwater vulnerability assessment using an improved DRASTIC method in GIS. **Resources, Conservation and Recycling**. 86: 74-86p. 2014.
- NOBRE, R.C.M. **Avaliação de Risco para o Uso e Proteção de Aquíferos. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió**. Tese de Doutorado, Dept. Eng. Civil, COPPE/UFRJ, 296p. 2006.
- OEA (Organização dos Estados Americanos). **Aquífero Guarani: programa estratégico de ação – edição bilingue**. Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai; OEA, 424p. 2009.
- OLIVEIRA, M.M.; LOBO FERREIRA, J.P.C. Cartografia da Vulnerabilidade à Poluição das Águas Subterrâneas do Concelho de Montemor-o-Novo Utilizando o Método DRASTIC. In: Cabral, J.J.S.P. (Org.). LOBO FERREIRA, J.P.C. (Org.). MONTENEGRO, S.M.G.L. (Org.). COSTA, W.D. (Org.). **Água Subterrânea: Aquíferos Costeiros e Aluviões, Vulnerabilidade e Aproveitamento**. Recife. Editora Universitária - UFPE. v. 1. 447p. 2004.
- QUELUZ, J. G. T.; STURARO, J. R. Espacialização da vulnerabilidade do aquífero Guarani no município de Ribeirão Bonito – SP. **II Simpósio de Geoestatística Aplicada em Ciências Agrárias**, Unesp - Botucatu. Anais...v. 01: 01-05p. 2011.
- PANAGOPOULOS, G. P.; ANTONAKOS, A. K.; LAMBRAKIS, N. J. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. **Hydrol J**. 14: 894–911p. 2006.
- RABELO, J.L. **Estudo da Recarga do Aquífero Guarani no Sistema Jacaré-Tietê**. Tese de Doutorado São Carlos, ESSSC-USP-SHS. 200p. 2006.
- RAHMAN, A. A. GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. **Applied Geography**, v. 48: 88-102 p. 2007.
- RUNDQUIST, D.C.; RODEKOH, D.A.M; PETERS, A.J.; EHRMAN, L.DI.; AND MURRAY, G. Statewide groundwater-vulnerability assessment in Nebraska using the DRASTIC/GIS model. **Geocarto International** 2: 51-58p. 1991.
- SENER, E.; DAVRAZ, A. Assessment of groundwater vulnerability based on a modified DRASTIC model, GIS and an analytic hierarchy process (AHP) method: the case of Egirdir Lake basin (Isparta, Turkey). **Hydrogeology Journal**, 21: 701–714p. 2013.
- SHIRAZI S.M.; IMRAN H.M.; AKIB S. GIS-based DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment: A review. **Journal of Risk Research**. Vol. 15(8): 991–1011p. 2012.
- SILVA, R. B. G. **Águas subterrâneas: um valioso recurso que requer proteção**. São Paulo: DAEE, 27p. 2003.
- VOUDOURIS K.; KAZAKIS N.; POLEMIO M.; KAREKLAS K. Assessment of intrinsic vulnerability using DRASTIC model and GIS in the Kiti aquifer, Cyprus. **European Water**. 30: 13-24p. 2010.

WATERLOO do Brasil. **Zoneamento dos recursos hídricos subterrâneos na Região do Polo Petroquímico de Camaçari**. Relatório Interno. Bahia: Cetrel, 109p. 2003.

ZABET, TA., Evaluation of aquifer vulnerability to contamination potential using the DRASTIC method. **Environmental Geology**, 43: 203–208p. 2002.