

VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUIFERO LIVRE DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAMAME/PB

Victor Hugo Rabelo Coelho^{1}; Franklin Mendonça Linhares²; Cristiano das Neves Almeida³; Alain Marie B. Passerat de Silans⁴ & Suzana Maria G. L. Montenegro⁵*

Resumo – As técnicas de mapeamento através dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) estão sendo cada vez mais utilizados para avaliar a vulnerabilidade natural e o risco de contaminação das águas subterrâneas. Este trabalho mostra o mapeamento das áreas vulneráveis à contaminação do aquífero livre da bacia hidrográfica do rio Gramame (BRG), através da utilização do método DRASTIC. Esse método calcula o índice de vulnerabilidade a partir do somatório de sete variáveis hidrogeológicas, morfológicas e físicas que constituem o sistema aquífero. O índice DRASTIC classificou a vulnerabilidade natural da BRG em cinco diferentes classes: insignificante, muito baixa, baixa, moderada e alta. A aplicação do DRASTIC mostra a importância do uso dos SIG's na proteção das águas subterrâneas quanto ao risco de contaminação.

Palavras-Chave – Sistemas de Informações Geográficas; Vulnerabilidade; DRASTIC.

VULNERABILITY TO CONTAMINATION OF GRAMAME BASIN RIVER AQUIFER/PB

Abstract – The mapping techniques through Geographic Information System (GIS) are more and more used to evaluate natural vulnerability and contamination risk of groundwater. This paper shows the use of DRATIC for mapping the vulnerability areas of the free aquifer of the Gramame watershed (BRG). This method calculates a vulnerability index based on a sum of seven factors, which are related to the hydrogeology, morphology and physics features of the aquifer. The DRASTIC index classified the aquifer into five vulnerability classes: negligible, very low, low, moderate and high. The DRASTIC application showed the importance of GIS in groundwater protection control.

Keywords – Geographic Information Systems; Vulnerability; DRASTIC.

¹ Doutorando em Engenharia Civil (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) pela UFPE. Email: victor-coelho@hotmail.com

² Mestre em Engenharia Urbana e Ambiental pela UFPB. Email: franklinlinhares.geo@gmail.com

³ Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPB, Bolsista PQ. Email: almeida74br@yahoo.com.br

⁴ Professor Voluntário do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPB, Bolsista PQ. Email: alainsilans@yahoo.com.br

⁵ Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da UFPE, Bolsista PQ. Email: suzanam.ufpe@gmail.com

*Autor correspondente

INTRODUÇÃO

Muitos países utilizam as águas subterrâneas para suprir suas necessidades no atendimento total ou parcial do abastecimento público e em outras atividades, como a indústria e a irrigação. Apesar de ser inquestionável a importância que as águas subterrâneas assumem em termos de qualidade e quantidade, poucas medidas de gerenciamento das águas subterrâneas foram tomadas no passado para evitar a sua contaminação. Rebouças (2006) aponta que a poluição provocada pelas atividades humanas é um dos fatores que colocam em risco a disponibilidade de água doce. Nesse sentido, as reservas de águas subterrâneas necessitam de um cuidado especial na sua preservação e utilização sustentável, já que possuem importância estratégica para as gerações presentes e futuras.

Atualmente, tem-se observado o desenvolvimento e a disseminação do uso de várias técnicas de mapeamento para a avaliação da vulnerabilidade natural e do risco de contaminação como uma ferramenta para a prevenção e a proteção das águas subterrâneas (Lake *et al.*, 2003). Esses mapas, gerados a partir da utilização de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), são geralmente elaborados a partir do cruzamento de vários níveis de informação. A metodologia DRASTIC, desenvolvida por Aller *et al.* (1987), é uma dessas técnicas que tem sido amplamente utilizada nos últimos anos (Bastida *et al.*, 2009; Bojórquez-Tapia *et al.*, 2009), principalmente por sua simplicidade de aplicação, que considera como fatores básicos o grau de inacessibilidade hidráulica da zona saturada e a capacidade de atenuação da zona não saturada.

Considerando esse contexto, este trabalho tem como objetivo mapear a vulnerabilidade e o risco de contaminação do aquífero livre da bacia hidrográfica do rio Gramame (BRG), através da utilização do método DRASTIC. Esse método foi escolhido devido a sua ampla aceitação internacional e por apresentar-se como método multiparamétrico que considera aspectos geomorfológicos, hidrogeológicos e físicos.

MATERIAS E MÉTODOS

Área de estudo

A BRG está localizada na região litorânea do Nordeste brasileiro, mais especificamente entre as coordenadas de 7°11' e 7°24' de latitude sul e 34°48' e 35°10' de longitude oeste, como mostra a Figura 1. Sua área de drenagem é de aproximadamente 590 km², banhando sete municípios do Estado da Paraíba, incluindo a sua capital João Pessoa. É considerada de grande importância para a região metropolitana de João Pessoa, devido à sua contribuição para o abastecimento d'água de cerca de um quarto da população do Estado da Paraíba, através do açude Gramame-Mamuaba, com capacidade de armazenamento na ordem de 56 milhões de m³ (PDRH, 2000). De acordo com Köppen, a classificação climática para a região é tropical chuvoso do tipo As', quente e úmido, sem períodos frios e com chuva predominante de outono-inverno. A proximidade da região com a linha do Equador determina as altas temperaturas durante o ano inteiro, com média superior aos 26°C, enquanto que a precipitação média anual varia entre 1400-1800 mm.

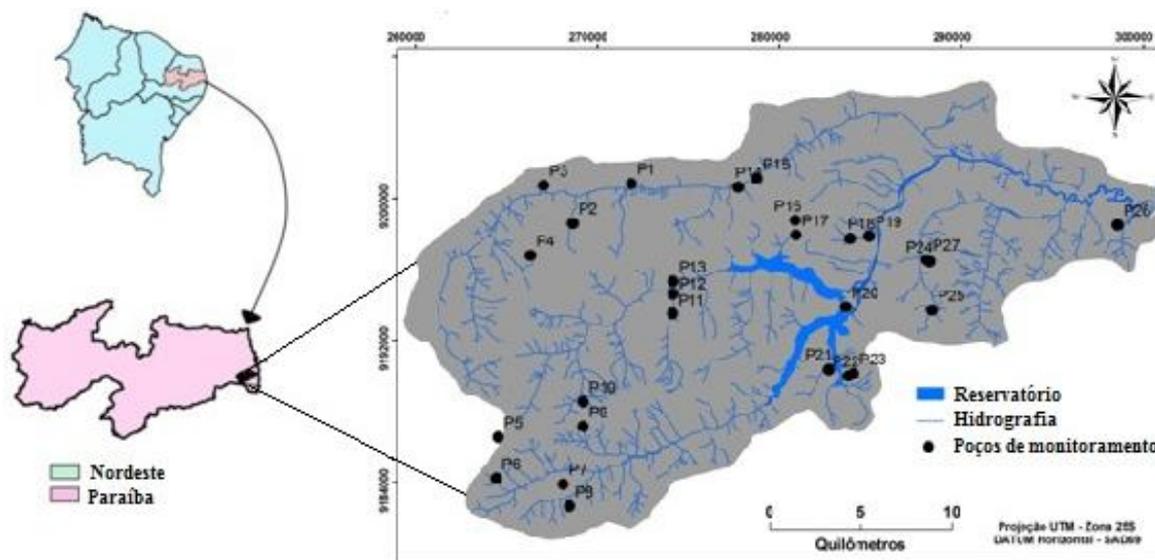


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Gramame e distribuição dos poços de monitoramento.

Método DRASTIC

O método DRASTIC de avaliação da vulnerabilidade de aquífero foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987) para a Agência de Proteção Ambiental Norte Americana (USEPA). Esse método calcula o índice de vulnerabilidade de águas subterrâneas a partir de sete variáveis importantes no controle do potencial da poluição das águas subterrâneas. Esses fatores correspondem ao somatório ponderado de indicadores hidrogeológicos, morfológicos e físicos que constituem o sistema aquífero. A Tabela 1 mostra as sete variáveis do DRASTIC e suas respectivas descrições.

Por utilizar um elevado número de fatores, o DRASTIC apresenta maior confiabilidade aos índices de vulnerabilidade finais obtidos, o que é relatado por diversos autores que aplicaram o método, entre eles: Babiker *et al.* (2005) e Nobre *et al.* (2006). Cada um desses fatores é avaliado em relação aos outros para determinar sua importância relativa na vulnerabilidade, sendo que os mais significantes recebem o peso 5 e os menos importantes recebem o peso 1. Os fatores também são divididos em intervalos ou classes de feições significativas, que exercem algum impacto no potencial de poluição. A esses fatores são atribuídos valores que variam de 1 a 10.

O DRASTIC é representado por um índice de potencial de vulnerabilidade obtido pela multiplicação dos produtos dos fatores por seus pesos. O somatório de todos esses fatores, por uma equação linear simples, permite a determinação dos valores numéricos para os contextos hidrogeológicos, morfológicos e físicos que representam o sistema aquífero. O índice de vulnerabilidade DRASTIC é obtido pela seguinte expressão:

$$DRASTIC = Dr.Dw + Rr.Rw + Ar.Aw + Sr.Sw + Tr.Tw + Ir.Iw + Cr.Cw \quad (1)$$

Em que Dr, Rr, Ar, Sr, Tr, Ir e Cr correspondem ao valor obtido para cada parâmetro na equação; e Dw, Rw, Aw, Sw, Tw, Iw, e Cw correspondem ao índice de ponderação. O valor mínimo do índice DRASTIC é 23, enquanto que o valor máximo é 226. Esses valores são colocados em diferentes faixas de variação. Quanto maior for o índice DRASTIC, maior será o potencial à poluição. Com base em diversos autores (Aller *et al.* 1987; Paralta & Francés, 2000), neste trabalho, foram adotados os intervalos e classes de vulnerabilidade apresentados na Tabela 2.

Tabela 1 – Variáveis do DRASTIC e suas respectivas descrições e pesos.

Variáveis	Peso	Descrição
Profundidade do topo do aquífero (<i>Depth to the water table</i>)	5	Profundidade do nível freático sob a superfície do terreno (numérica). Influi no tempo de trânsito.
Recarga (<i>Net Recharge</i>)	4	Recarga que recebe o aquífero (numérico). Influi no tempo de trânsito.
Material do aquífero (<i>Aquifer material</i>)	3	Litotipo e estrutura do material do aquífero (por categoria). Influi na renovação de água no aquífero.
Tipo de solo (<i>Soil type</i>)	2	Tipo de solo (por categoria). Influi no transporte de massa de contaminantes não conservativos.
Topografia (<i>Topography</i>)	1	Inclinação do terreno (numérico para categoria). Influi na evacuação da água com contaminante por escoamento superficial e subsuperficial.
Material da zona não-saturada (<i>Impact of the unsaturated zone</i>)	5	Natureza da zona não saturada (por categoria). Influi no transporte de contaminantes relativos.
Condutividade hidráulica (<i>Hydraulic Conductivity</i>)	3	Condutividade hidráulica (permeabilidade). Influi na renovação da água no aquífero.

Tabela 2 – Intervalos de valores do DRASTIC e suas respectivas classificações quanto a vulnerabilidade.

Intervalos de valores do DRASTIC	Classificação da vulnerabilidade
<100	Vulnerabilidade insignificante
101-119	Vulnerabilidade muito baixa
120-139	Vulnerabilidade baixa
140-159	Vulnerabilidade moderada
160-179	Vulnerabilidade alta
180-199	Vulnerabilidade muito alta
>200	Vulnerabilidade extrema

RESULTADOS

Para a obtenção de um valor final do índice DRASTIC, foram adquiridas informações dos sete fatores necessários. No entanto, para este trabalho, serão apresentados e discutidos apenas os fatores que possuem maiores pesos, são eles: a profundidade da zona não-saturada do solo, a recarga, o material do aquífero, o material da zona não-saturada e a condutividade hidráulica.

Profundidade do topo do aquífero (D)

O monitoramento da variação dos níveis estáticos do aquífero livre da BRG foi realizado a partir de 27 poços distribuídos na bacia, como mostra a Figura 1. Os dados são referentes ao período de um ano hidrológico (novembro de 2010 a outubro de 2011). A frequência de obtenção desses dados variou de acordo com a distribuição temporal da precipitação na região, sendo que no período de estiagem foi adotada uma frequência mensal e nos meses de precipitações mais frequentes e intensas na região (maio, junho e julho), o intervalo da medição foi quinzenal. A profundidade do NE nos 27 poços variou entre 1,5 e 29 metros, com o intervalo de índice de ponderação 7 ultrapassando 67% da área da bacia, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Profundidade do topo do aquífero com os intervalos das classes e seus respectivos pesos e áreas.

Intervalos de classes (m)	Dr	Dr x Dw	Área (km ²)	Área (%)
1,5 – 4,6	9	45	8,08	1,37
4,6 – 9,1	7	35	398,65	67,68
9,1 – 15,2	5	25	174,51	29,62
15,2 – 22,9	3	15	7,51	1,28
22,9 – 29	2	10	0,38	0,07

Recarga (R)

Os dados de recarga da BRG utilizados nesta pesquisa foram obtidos por Coelho *et al.* (2012) para 19 dos 27 poços monitorados, a partir da análise da variação temporal do nível freático e da aplicação da metodologia WTF (*Water Table Fluctuation*), que também foi utilizada por Wendland *et al.* (2007) e Sibanda *et al.* (2009). Os valores de recarga, obtidos para cada poço monitorado da bacia, variaram entre 13,9 mm/ano e 190,5 mm/ano. A partir dessas informações, foram definidos quatro intervalos, como mostra a Tabela 4, com grande parte da área da BRG inserida no intervalo de classe de recarga entre 51 mm/ano e 102 mm/ano, com índice de ponderação 3.

Tabela 4 – Recarga com os intervalos das classes e seus respectivos pesos e áreas.

Intervalos de classes (mm/ano)	Rr	Rr x Rw	Área (km ²)	Área (%)
< 51	1	4	57,55	9,77
51 – 102	3	12	495,71	84,14
102 – 178	6	24	35,78	6,07
178 – 190	8	32	0,09	0,02

Material do aquífero (A) e material da zona não-saturada (I)

Cada material que compõe o aquífero apresenta os intervalos de classes de ponderação, sejam eles geológicos ou hidrogeológicos. Os fatores de influência da zona vadosa (I) e material do aquífero (A) foram baseados nas mesmas condições, já que não existem diferenças na constituição geológica e hidrogeológica da área de estudo.

O mapa geológico utilizado neste trabalho foi elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), na escala de 1:200.000. Estão presentes na BRH cinco Formações hidrogeológicas: Barreiras, Beberibe, Granitóides, Sertânia e os Depósitos Fluvio-Marinhas. As Formações Barreiras e Beberibe são sedimentares e, portanto, de porosidade primária, intersticial. As formações Sertânia e o Grupo Granitóides são aquíferos de porosidade secundária, fissural, porquanto são constituídos de rochas cristalinas. A maior parte do aquífero livre da bacia está inserida na Formação Barreiras (60,8%), como mostra a Tabela 5, que apresenta maior vulnerabilidade do que as Formações Sertânia, Granitóides e Beberibe por serem constituídas de sedimentos areno-argilosos mal selecionados.

Tabela 5 – Formações hidrogeológicas e seus respectivos pesos e áreas.

Formações Hidrogeológicas	Ar	Ar x Aw	Área (km ²)	Área (%)
Depósitos fluvio-marinhos	9	27	107,48	18,24
Formação Barreiras	7	21	358,11	60,78
Formação Beberibe	5	15	45,52	7,73
Formação Sertânia	3	9	39,5	6,7
Formação Granitóides	3	9	38,45	6,53

Condutividade Hidráulica (C)

Os dados de condutividade hidráulica da BRG foram obtidos através da metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.* 1994; Lassabatère *et al.* 2006) em 33 pontos bem distribuídos na bacia. Cinco classes de condutividade hidráulica, variando entre 0,35 m/dia e 64,2 m/dia, foram consideradas neste estudo, como mostra a Tabela 6. Os dados extrapolados indicam que 80,49% da área da BRG possuem condutividade hidráulica variando entre 4,1 m/dia e 28,5 m/dia. As classes com maiores intervalos, variando entre 28,5 m/dia e 64,2 m/dia, estão localizadas na região central da bacia, onde o solo é mais arenoso, e representam pouco menos de 6% da área total.

Tabela 6 – Condutividade hidráulica com os intervalos de classes e seus respectivos pesos e áreas.

Intervalos de classes (m/dia)	Tr	Tr x Tw	Área (km ²)	Área (%)
< 4,1	1	3	79,66	13,52
4,1 – 12,2	2	6	277,99	47,18
12,2 – 28,5	4	12	196,25	33,31
28,5 – 40,7	6	18	23,96	4,07
40,7 – 64,2	8	24	11,29	1,92

Vulnerabilidade do aquífero

Os parâmetros do índice DRASTIC indicaram cinco diferentes classes de vulnerabilidade natural na bacia hidrográfica do rio Gramame, classificadas como: insignificante, muito baixa, baixa, moderada e alta. Como apresentado na Tabela 7 e Figura 2, grande parte da bacia (84,94%) apresenta vulnerabilidade à contaminação do aquífero variando entre insignificante e baixa.

Tabela 7 – Índices de vulnerabilidade da bacia hidrográfica do rio Gramame e suas respectivas áreas.

Índice DRASTIC	Vulnerabilidade	Área (km ²)	Área (%)
> 18	Insignificante	86,83	14,75
12 – 18	Muito baixa	126,04	21,41
6 – 12	Baixa	287,11	48,78
2 – 6	Moderada	88,23	14,99
< 2	Alta	0,18	0,03

A região que apresenta a vulnerabilidade moderada e alta está localizada no centro da BRG, onde possui a maior concentração de solo com textura arenosa e os maiores valores de recarga. Outra característica definidora das áreas de maior vulnerabilidade é a proximidade do nível freático

em relação à superfície do terreno, já que em grande parte da bacia a camada não saturada do solo é pouco espessa.

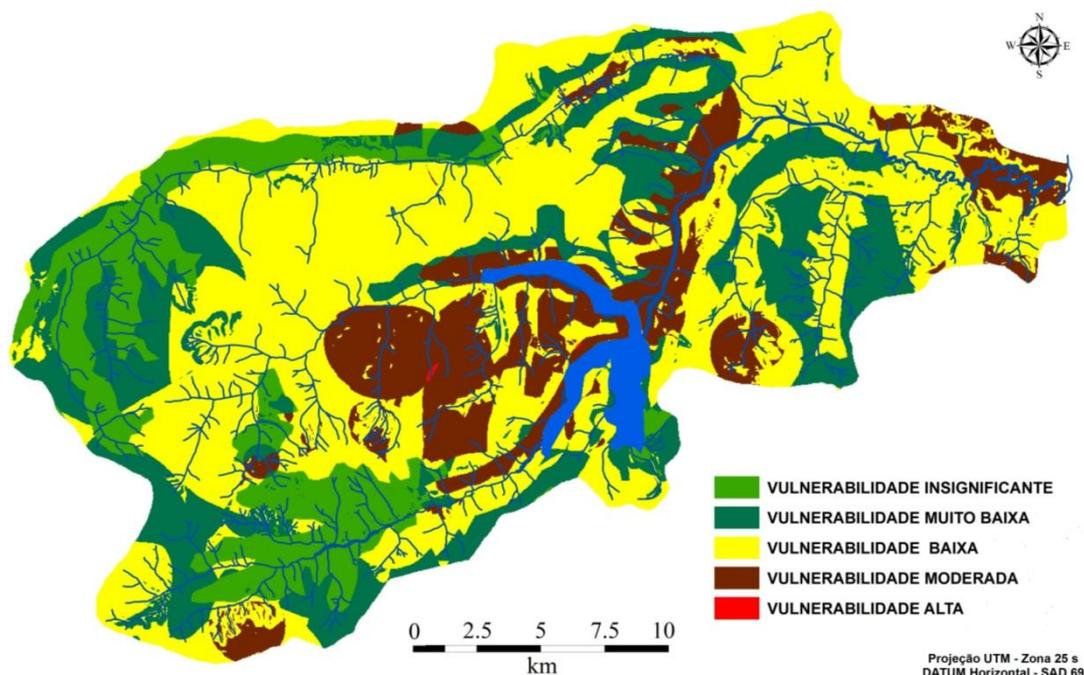


Figura 2 – Mapa de vulnerabilidade da bacia hidrográfica do rio Gramame.

CONCLUSÕES

A avaliação da vulnerabilidade do aquífero livre da BRG, a partir da aplicação do método DRASTIC, mostrou a importância do uso dos SIG's na detecção de áreas com potencial de poluição das águas subterrâneas, através do processamento e espacialização das características envolvidas no índice. Esses resultados permitirão o estabelecimento de protocolos para a criação de condições mais favoráveis para a proteção das águas subterrâneas da bacia hidrográfica, priorizando áreas específicas de proteção e estratégias para o monitoramento do aquífero livre local. Auxiliará, dessa maneira, na tomada de decisões quanto ao uso e ocupação do solo para a preservação ambiental e a manutenção da qualidade de vida da população que depende das águas subterrâneas.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao suporte financeiro concedido pela FINEP ao projeto BEER (Bacias Experimentais e Representativas do Semi-Árido), e as bolsas de mestrado, doutorado e PQ fornecidas pela CAPES, FACEPE e CNPq, respectivamente.

REFERÊNCIAS

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J. (1987). *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. USEPA-600/2-85/018.

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

- BASTIDA, J. J. M.; ARAUZO, M.; VALLADOLID, M. (2009). *Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution*. Hydrogeology Journal 18 (3-4), pp. 681-698.
- BOJÓRQUEZ-TAPIA, L. A.; CRUZ-BELLO, G. M.; LUNA-GONZÁLEZ, L.; JUÁREZ, L.; ORTIZ-PÉREZ, A. (2009). *V-DRASTIC: Using visualization to engage policymakers in groundwater vulnerability assessment*. Journal of Hydrology 373, pp. 242-255.
- COELHO, V. H. R.; ALMEIDA, C. N.; SILANS, A. M. B. P. (2012). *Análise da flutuação do nível d'água para estimativa da recarga subterrânea da bacia representativa do rio Gramame no Nordeste brasileiro*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 17 (2-4), pp. 241-252.
- HAVERKAMP, R.; ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J.; PARLANGE, J. Y. (1994). *Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation*. Water Resources Research, Washington 30, pp. 2931-2935.
- LAKE, I. R.; LOVETT, A. A.; HISCOCK, K. M. (2003). *Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS*. Journal Environmental Management 68, pp. 315-328.
- LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILO, R.; SORIA UGALDE, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. (2006). *Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST*. Soil Science Society of America Journal 70, pp. 521-532.
- NOBRE, R. C. M.; ROTUNNO, O. C.; MANSUR, W. J.; NOBRE, M. M. M.; COSENZA, C. A. N. (2007). *Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool*. Journal of Contaminant Hydrology 94, pp. 277– 292.
- PARALTA, E.; FRANCÉS, A. (2000). *Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição do complexo gabro-diorítico de Serpa-Brinches (sector oriental do sistema aquífero dos Gabros de Beja)*. Revista da Associação Portuguesa de Geólogos 14, pp. 27-35.
- PDRH. (2000). *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gramame*. SEMARH/SCIENTEC.
- REBOUÇAS, A. C. (2006). *Águas Subterrâneas*. In: *Águas Doces no Brasil*. Org. por REBOUÇAS A. C.; BRAGA B; TUNDISI J. G. São Paulo: Escrituras Editora, pp. 111-144.
- SIBANDA, T.; NONNER, J. C.; UHLENBROOK, S. (2009). *Comparison of groundwater recharge estimation methods for the semi-arid Nyamandhlovu area, Zimbabwe*. Hydrogeology Journal 17, pp. 1427-1441.
- WENDLAND, E.; BARRETO, C.; GOMES, L. H. (2007). *Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring*. Journal of Hydrology 342, pp. 261-269.