



Sociedade & Natureza

ISSN: 0103-1570

sociedadnatureza@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia

Brasil

Mendonça Linhares, Franklin; das Neves Almeida, Cristiano; Passerat de Silans, Alain Marie B.;

Rabelo Coelho, Victor Hugo

AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE E DO RISCO À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAMAME (PB)

Sociedade & Natureza, vol. 26, núm. 1, enero-abril, 2014, pp. 139-157

Universidade Federal de Uberlândia

Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321330589010>

- [Cómo citar el artículo](#)
- [Número completo](#)
- [Más información del artículo](#)
- [Página de la revista en redalyc.org](#)

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## **AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE E DO RISCO À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO GRAMAME (PB)**

### **Assessment of vulnerability and risk to contamination of Gramame basin river groundwater (Paraíba, Brazil)**

*Franklin Mendonça Linhares*  
UFPB, João Pessoa, Paraíba, Brasil.  
franklinlinhares@ig.com.br

*Cristiano das Neves Almeida*  
UFPB, João Pessoa, Paraíba, Brasil.  
lmeida74br@yahoo.com.br

*Alain Marie B. Passerat de Silans*  
UFPB, João Pessoa, Paraíba, Brasil.  
alainsilans@yahoo.com.br

*Victor Hugo Rabelo Coelho*  
UFPB, João Pessoa, Paraíba, Brasil.  
victor-coelho@hotmail.com

Artigo recebido em 05/06/2013 e aceito para publicação em 22/10/2013.

**RESUMO:** Os mapas de vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas, elaborados a partir de Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), vêm sendo cada vez mais utilizados para dar suporte aos planos de gestão ambiental dos órgãos governamentais e não-governamentais. Este artigo mostra o mapeamento das áreas vulneráveis à contaminação do aquífero livre da bacia hidrográfica do rio Gramame (BRG). Os métodos DRASTIC e DRASTIC modificado foram as ferramentas utilizadas nesta pesquisa. Esses métodos calculam o índice de vulnerabilidade a partir do somatório de parâmetros ambientais. No DRASTIC modificado, além dos sete parâmetros já utilizados no DRASTIC (profundidade da zona não saturada do solo, recarga, material do aquífero, tipo de solo, topografia, material da zona não saturada e condutividade hidráulica), foram incluídos os fatores cobertura e uso do solo. Os resultados do DRASTIC mostram que, para o período chuvoso, foram identificadas três classes de vulnerabilidade (baixa, moderada e alta) para a área de estudo, com predominância da classe moderada. Para o período de estiagem, a vulnerabilidade apresentou, basicamente, apenas duas classes de vulnerabilidade: a baixa e a moderada. Com a inserção dos fatores uso e cobertura do solo, as áreas de vulnerabilidade alta passaram para o nível muito alto, e as áreas de vulnerabilidade moderada passaram para a classe de risco de contaminação 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:** DRASTIC, SIG's, vulnerabilidade, águas subterrâneas.

**ABSTRACT:** The contamination vulnerability maps of groundwater, created with help of Geographic Information Systems (GIS), are being increasingly used to support environmental management plans of governmental and non-governmental organizations. This paper shows the mapping of vulnerable areas to contamination of the free aquifer of Gramame river basin (BRG in Portuguese). The methods DRASTIC and modified

DOI: 10.1590/1982-451320140110

DRASTIC were the tools used in this research. These methods calculate the vulnerability index based on the sum of environmental parameters. The DRASTIC considers seven factors: Depth to water, net Recharge, Aquifer media, Soil media, Topography, Impact of vadose zone and hydraulic Conductivity, whereas the modified DRASTIC considers also the land use and land cover factors. The results show that the DRASTIC, for the rainy season, identified three vulnerability classes (low, moderate and high) for the study area, with a predominance of moderate class. For the dry period, the vulnerability had basically two vulnerability classes: low and moderate. When the land use and land cover factors were considered, areas of high vulnerability became very high level, and areas of moderate vulnerability became high risk class of contamination. The DRASTIC application shows the importance of the use of GIS's in groundwater protection to risk of contamination.

**Keywords:** DRASTIC, GIS's, vulnerability, groundwater.

## INTRODUÇÃO

Os mapas de vulnerabilidade de contaminação das águas subterrâneas vêm sendo cada vez mais utilizados para dar suporte aos planos de gestão ambiental dos órgãos governamentais e não-governamentais, como demonstraram diversas investigações nos últimos anos (RAHMAN, 2008; BASTIDA *et al.*, 2009; BOJÓRQUEZ-TAPIA *et al.*, 2009; MAIA, 2011). Esses mapas, elaborados a partir do cruzamento de vários níveis de informações em Sistemas de Informações Geográficas (SIG's), têm como objetivo identificar áreas que possuem características naturais mais ou menos vulneráveis para a contaminação dos aquíferos, como afirmaram Aller *et al.* (1987), Oliveira & Lobo Ferreira (2004), Auge (2004), Hirata & Fernandes (2008), Cutrim & Campos (2010), Ribeiro *et al.* (2011) e Huan *et al.* (2012).

Vários métodos de avaliação de vulnerabilidade de aquíferos têm sido desenvolvidos, aplicados e testados em várias regiões, desde os mais simples até os mais complexos (POLEMIO *et al.*, 2009). Os métodos mais utilizados, devido a sua facilidade, são os de índices e sobreposição (AUGE, 2004; ANTONAKOS & LAMBRAKIS, 2006; HUAN *et al.*, 2012), baseados na combinação de mapas com fatores hidrogeológicos do aquífero e outras variáveis com um valor numérico para cada atributo (ALMASRI, 2008). Em uma forma mais qualitativa, eles empregam um sistema de valores numéricos e pesos aos atributos que constituem o aquífero, permitindo a obtenção de classes de vulnerabilidade.

Dentre os métodos mais utilizados, dois ganham destaque: o método GOD (FOSTER, 1987; FOSTER & HIRATA, 1988), que trata da vulnerabilidade geral

a partir da combinação de três parâmetros físicos do aquífero, e o método DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987), que se constitui em um sistema padronizado de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos a partir de dados de sete parâmetros hidrológicos, morfológicos e físicos.

Polemio *et al.* (2009) aplicaram seis métodos de avaliação da vulnerabilidade em um aquífero cárstico da Itália, entre eles o GOD e o DRASTIC. Em suas conclusões, afirmaram que o método GOD deve ser usado principalmente para mapear a avaliação da vulnerabilidade em áreas muito amplas, com pequenas escalas ou com contrastes de alta vulnerabilidade, devido ao número reduzido de parâmetros considerados.

Babiker *et al.* (2005) aplicaram o DRASTIC em uma bacia hidrográfica na região central do Japão. Os dados obtidos nesse estudo foram satisfatórios, com predominância das classes de vulnerabilidade alta, moderada e baixa nas partes ocidental e oriental do aquífero, respectivamente, enquanto que as partes mais elevadas foram classificadas como de baixa vulnerabilidade.

No DRASTIC, por motivo de discrepâncias observadas em alguns casos entre os mapas de vulnerabilidade e os mapas de nitrato, modificações têm sido propostas (ROSEN, 1994; RUPERT, 2001; STIGTER *et al.*, 2006; MAIA, 2011). As mudanças são essencialmente em relação à adição de novos fatores mais específicos de uma determinada localidade (ANATONAKOS & LAMBRAKIS, 2007; DENNY *et al.*, 2007). Essas modificações realizadas no DRASTIC foram aplicadas, por exemplo, em mapeamentos de risco de contaminação de águas subterrâneas por Secunda *et al.* (1998), em Israel, e por Eimers *et al.* (2000), nos Estados Unidos. Esses autores utilizaram o DRASTIC adicionando os fatores cobertura do solo

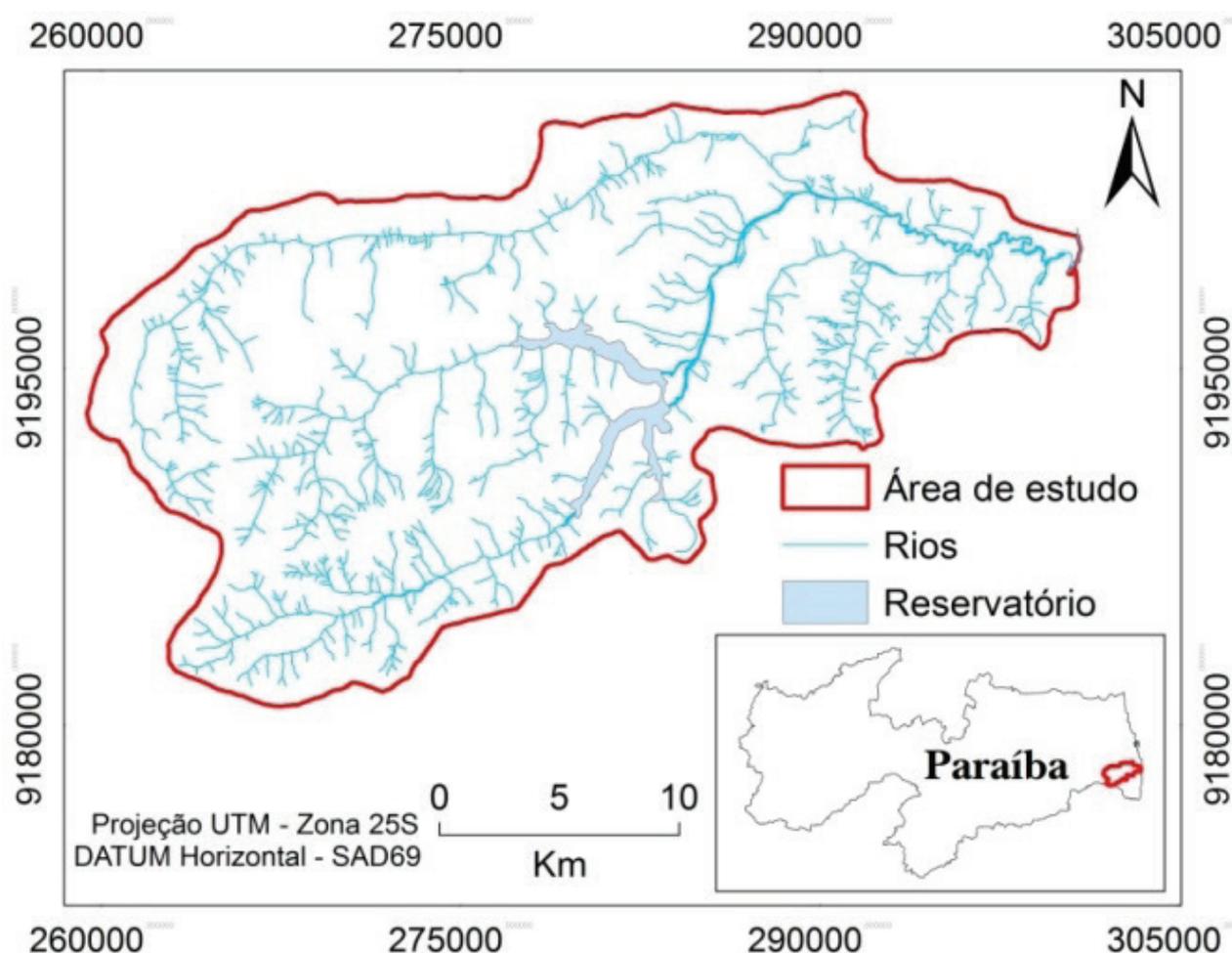
e uso do solo para determinar as áreas de maior risco de contaminação nas duas regiões estudadas. Os produtos obtidos nos dois trabalhos mostram eficiência nos seus resultados.

Diante do exposto, procurou-se realizar neste trabalho um mapeamento da vulnerabilidade e do risco de contaminação do aquífero livre da bacia hidrográfica do rio Gramame (BRG), já que muitos indicadores de impactos ambientais foram diagnosticados por Coelho *et al.* (2012) e Targino (2012) para essa bacia hidrográfica. O método escolhido foi o DRASTIC, por ser um método multiparamétrico bastante completo e amplamente aceito (RUEDA & BETANCUR, 2006; DENNY *et al.*, 2007; JAMRAH *et al.*, 2007; BASTIDA *et al.*, 2009; BOJÓRQUEZ-TAPIA *et al.*, 2009; POLEMIO *et al.*, 2009; MARQUEZAN *et al.*, 2011).

## ÁREA DE ESTUDO

A BRG, local de estudo deste trabalho, possui uma área de drenagem de aproximadamente 590 km<sup>2</sup>, localizada entre as coordenadas de 7°11' e 7°24' de latitude sul e 34°48' e 35°10' de longitude oeste (Figura 1). Essa bacia hidrográfica foi escolhida para a pesquisa por ser representativa de uma larga faixa do litoral nordestino, onde são encontrados os aquíferos Barreiras e Beberibe, vastas áreas com plantação de cana-de-açúcar, e características hidroclimatológicas semelhantes. De acordo com a classificação climática de Köeppen, a região possui um clima tropical chuvoso, sem períodos frios e com chuva predominante de outono-inverno. A temperatura média anual é superior a 26°C, com precipitações variando entre 1400 e 1800 mm/ano (PDRH, 2000).

Figura 1 – Localização da área de estudo.



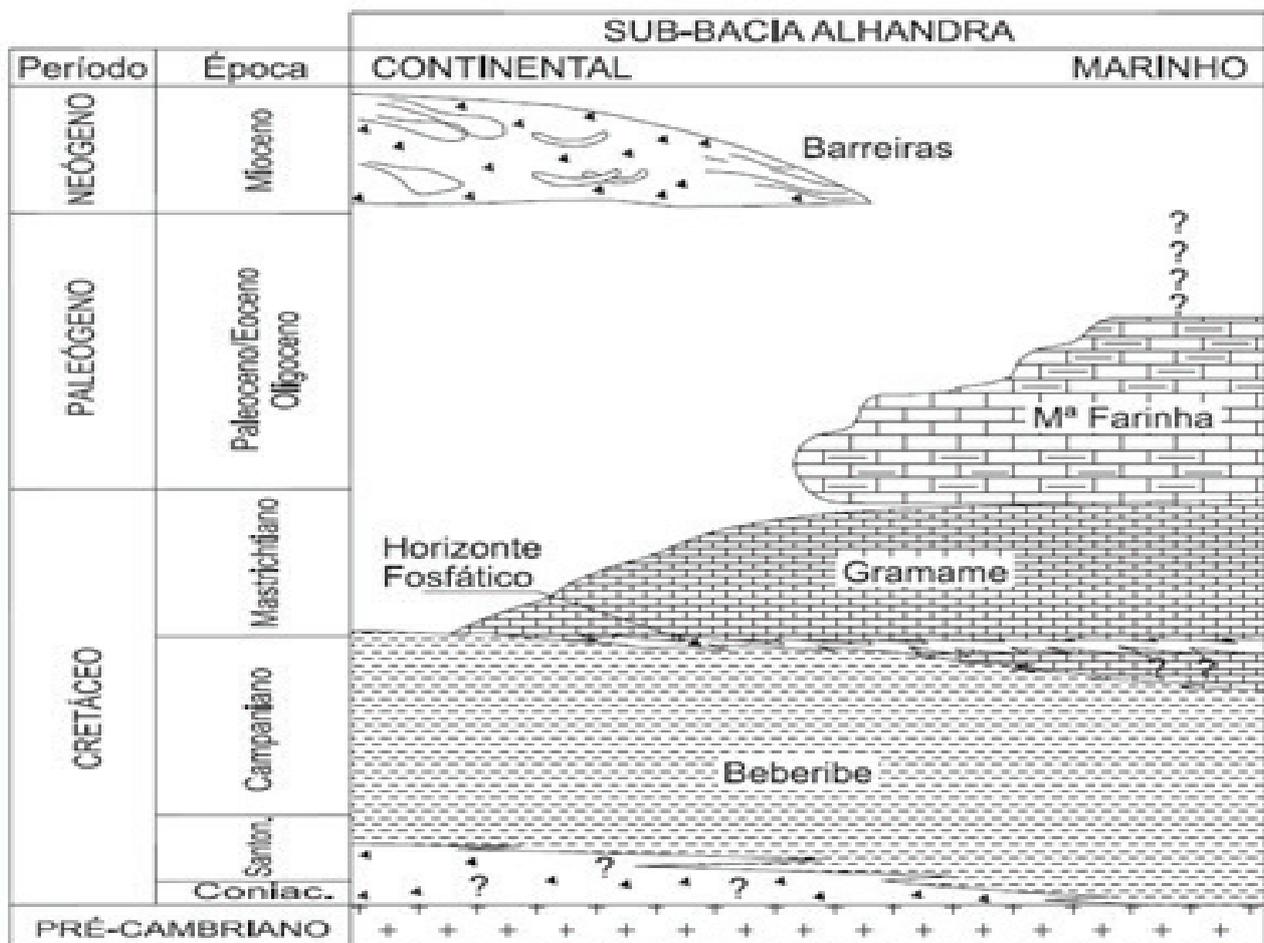
### Geologia e Hidrogeologia Local

A BRG está inserida na Bacia Sedimentar Paraíba (BSP), que se limita ao sul pela Zona de Cisalhamento de Pernambuco (ZCPE), e ao norte pela falha de Mamanguape. Essa última representa uma ramificação da Zona de Cisalhamento de Patos (ZCPA) (BARBOSA *et al.*, 2007). A BSP é subdividida em três sub-bacias, compartimentadas, respectivamente, no sentido norte-sul em: Miriri, Alhandra e Olinda. O aquífero livre da bacia do rio Gramame, área de estudo deste trabalho, está contida, em sua totalidade, na Sub-Bacia Alhandra (SBA).

Na SBA, como mostra a Figura 2, estão dispostas quatro unidades litoestratigráficas, depositadas em períodos geológicos distintos, como mencionaram Furrier *et*

*al.* (2006). A unidade litoestratigráfica basal é denominada de Formação Beberibe, representada por um espesso pacote de arenitos com granulação variável e espessura média de 230 a 280 m. Acima da Formação Beberibe repousa de forma concordante a Formação Gramame, de ambiente marinho raso, espessura média inferior a 55 m e predominância de calcários argilosos cinzentos. A continuação da sequência calcária da Formação Gramame, diferenciada apenas pelo conteúdo fóssilífero, cuja espessura máxima é de 30 m, é denominada de Formação Maria Farinha. Recobrendo de forma discordante todas as rochas sedimentares da BSP descritas acima e o embasamento cristalino pré-cambriano, encontram-se os sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras (FURRIER *et al.*, 2006), onde os poços estudados neste trabalho estão inseridos.

Figura 2 – Estratigrafia da Bacia Sedimentar Paraíba (Fonte: FURRIER *et al.*, 2006).



Os sedimentos da Formação Barreiras, porção do aquífero livre estudada, são provenientes do processo de intemperismo sobre o embasamento cristalino do Planalto da Borborema, e possuem espessura bastante variável no Estado da Paraíba, podendo atingir até 80 m (ALHEIROS *et al.*, 1988).

## METODOLOGIA

O método de avaliação da vulnerabilidade de aquífero, denominado DRASTIC, 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 dos fatores hidrogeológicos, morfológicos, físicos e de parametrização das características dos aquíferos.

O DRASTIC emprega fatores que incorporam características físicas importantes no controle do potencial da poluição das águas subterrâneas. Esses fatores correspondem ao somatório ponderado de

sete variáveis, que representam os indicadores hidrogeológicos, morfológicos e físicos que constituem o sistema aquífero. A Tabela 1 mostra os sete fatores 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: Melo Junior (2002), Lobo Ferreira & Oliveira (2004), Babiker *et al.*, (2005) e Nobre (2006).

Cada um dos fatores do método DRASTIC é avaliado em relação aos outros para determinar sua importância relativa na vulnerabilidade. Sendo que os mais significantes recebem o peso 5. Já os menos importantes recebem o peso 1. A Tabela 1 relaciona os pesos atribuídos a cada fator DRASTIC e suas descrições.

Cada um desses fatores também é dividido em intervalos ou classes de feições significativas, que exercem algum impacto no potencial de poluição. Para esses fatores são atribuídos valores que variam de 1 a 10.

Tabela 1 - Fatores do DRASTIC e suas respectivas descrições e pesos.

FATORES	PESO	DESCRIÇÃO
Profundidade da zona não saturada do solo ( <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 do 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 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.
Condutividade hidráulica ( <i>Hydraulic Conductivity</i> )	3	Condutividade hidráulica (permeabilidade). Influi na renovação da água no aquífero.

Org. dos autores.

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 e morfológicos que representam o sistema aquífero. O índice de vulnerabilidade DRASTIC é obtido pela seguinte expressão:

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

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 peso de cada fator considerado pelo método DRASTIC.

O valor mínimo do índice DRASTIC é 23, enquanto que o máximo é 226, tornando possível a identificação de áreas mais susceptíveis à contaminação das águas subterrâneas. 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; LOBO FERREIRA & OLIVEIRA, 1993; PARALTA & FRANCÉS, 2000), neste trabalho foram adotados os intervalos e classes de vulnerabilidade apresentados na Tabela 2.

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

INTERVALO DO ÍNDICE DRASTIC	CLASSIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE
<120	Vulnerabilidade baixa
121-159	Vulnerabilidade moderada
160-179	Vulnerabilidade alta
180-199	Vulnerabilidade muito alta
>200	Vulnerabilidade extrema

Org. dos autores.

Os fatores do DRASTIC variam especialmente, de forma que o produto final do método é um mapa com a classificação da vulnerabilidade. Para a obtenção desse mapa, as seguintes etapas foram realizadas:

#### **Profundidade da Zona Não Saturada do Solo (D)**

O monitoramento da variação dos níveis estáticos do aquífero livre da BRG foi realizado a partir de 27 poços. Esses dados correspondem ao período de um ano hidrológico, e foram coletados de novembro de 2010 até 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 na coleta. Nos meses de maio, junho e julho, quando as precipitações são mais frequentes e intensas na região, o intervalo da medição foi quinzenal.

Entre os meses de abril e agosto, quando foram constatadas as menores profundidades da zona não saturada do solo, os dados de níveis estáticos foram agrupados para representar a média mensal do período chuvoso. Entre os meses de setembro e março,

os dados de níveis estáticos foram agrupados para representar a média mensal do período de estiagem.

Os dados das variações entre o período chuvoso e de estiagem serviram de informações para realizar um comparativo das áreas mais vulneráveis entre os dois períodos.

#### **Recarga (R)**

Os dados de recarga do aquífero livre da BRG utilizados nesta pesquisa foram obtidos por Coelho *et al.* (2012) a partir do método WTF (*Water Table Fluctuation*), baseado na análise da variação temporal do nível freático.

#### **Material do Aquífero (A)**

Cada material que compõe o aquífero apresenta os intervalos de classes de ponderação, sejam eles geológicos ou hidrogeológicos. O mapa geológico da BRG utilizado neste trabalho foi elaborado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), na escala de 1:200.000.

### **Tipo de Solo (S)**

O mapa de solo da BRG utilizado neste estudo foi o do Plano Diretor da Bacia do Rio Gramame (2000), na escala de 1:500.000. O mapa foi atualizado para o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2006).

### **Topografia (T)**

Para a elaboração do mapa de declividade, foram utilizadas as cartas topográficas da Jacumã (folha SB.25-Y-C-III-3-NE), Santa Rita (folha SB.25-Y-C-III-1-SO), Nossa Senhora da Penha (folha SB.25-yc-III-1-SE), Conde (folha SB.25-y-c-III3-NO) e Cruz do Espírito Santo (folha SB.25-y-c-II-2-SE), todas na escala de 1:25.000, com equidistância entre as curvas de nível de 10 m. Após a escanerização das cartas, as mesmas foram georeferenciadas. Em seguida, as curvas de nível foram vetorizadas. Após esses procedimentos, foram atribuídos os respectivos valores de altitude, posteriormente reagrupados, gerando, assim, um arquivo de isolinhas.

### **Material da Zona Não Saturada (I)**

A representação cartográfica da hidrogeologia da BRG adotado neste estudo foi elaborada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), dentro do Projeto SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas), na escala de 1:200.000.

### **Condutividade Hidráulica (C)**

Os dados de condutividade hidráulica da BRG utilizados neste trabalho foram os mesmos obtidos por Coelho (2011), a partir da utilização do método Beerkan (HAVERKAMP *et al.* 1994; LASSABATÈRE *et al.* 2006), para 33 pontos bem distribuídos na bacia hidrográfica. Esse método permite determinar a curva de retenção da água no solo,  $\theta(h)$ , e a curva de condutividade hidráulica,  $K(\theta)$ , a partir de ensaios simplificados de infiltração e análises de distribuição do tamanho das partículas do solo.

Esses sete fatores descritos geram sete mapas, que são utilizados para gerar o mapa final de vulnerabili-

dade. Para este trabalho, como foi realizada uma modificação no método, outros dois mapas foram gerados, a fim de produzir o mapa de risco de contaminação, a saber:

### **Modificação do DRASTIC**

Além dos sete fatores utilizados pela metodologia DRASTIC, foram incluídos, neste trabalho, os fatores Cobertura do Solo (*Land Cover*) e Uso do Solo (*Land Use*), já utilizados por Eimers (2000) para modificar o método DRASTIC. Para esses dois fatores também foram atribuídos valores de classes que variam entre 1 e 10.

Para cada valor do fator foi aplicado um índice de ponderação, que variou entre 2 para a cobertura do solo e 3 para o uso do solo. Quantificando, assim, a importância relativa entre eles. Ou seja, quanto maior o valor, maior a importância do fator avaliado. O risco de contaminação foi obtido através do somatório do produto entre as classes de ponderação e os fatores considerados, como apresentado a seguir:

$$\text{DRASTIC modificado} = \text{Dr.Dw} + \text{Rr.Rw} + \text{Ar.Aw} + \text{Sr.Sw} + \text{Tr.Tw} + \text{Ir.Iw} + \text{Cr.Cw} + \text{LCr.LCw} + \text{LUr.LUw} \quad (2)$$

Onde LCr e LUr são valores obtidos para os parâmetros cobertura do solo e uso do solo, respectivamente; e LCw e LUw são seus índices de ponderação.

Os demais fatores, ou seja, as sete primeiras parcelas do lado direito da Equação (2), são os mesmos da Equação (1). Para a inclusão dos outros dois fatores da modificação do método DRASTIC, foi definida a seguinte etapa:

### **Avaliação da Cobertura do Solo (LC) e uso do solo (LU)**

Para este estudo, as classes de uso do solo utilizam a mesma fonte de informação que as classes de cobertura do solo, mas têm objetivos e pesos diferentes. As classes e os pesos do uso do solo e cobertura do solo são os mesmos utilizados por Eimers *et al.* (2000), e são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Descrição do uso do solo e cobertura do solo com suas respectivas descrições e classes.

COBERTURA DO SOLO (LC) E USO DO SOLO (LU)	DESCRIÇÃO	PESO DO LC	PESO DO LU
Comercial/industrial	Solo utilizado para a manufatura ou venda de bens.	1	10
Água	Áreas cobertas de água	2	1
Áreas úmidas com lenhosas	Áreas com florestas ou arbustos onde o solo ou substrato é periodicamente saturado.	2	1
Áreas úmidas com vegetação emergente	Áreas com vegetação herbáceas perene, onde o solo ou substrato é periodicamente saturado.	2	1
Residencial de alta densidade	Áreas residências densas, em que a vegetação ocupa menos de 20% da área e a construção entre 80 e 100%.	2	8
Residencial de baixa densidade	Principalmente áreas suburbanas, em que a construção cobre cerca de 30 a 80% da área.	4	7
Transição	Áreas com alteração dinâmica na sua cobertura.	5	7
Pedreiras/minas a céu aberto/saibreiras	Áreas de indústrias mineiras extrativa, com exposição significativa do solo.	6	5
Agricultura	Áreas dominadas por vegetação plantada e/ou utilizada para produção.	6	7
Solo esquelético	Rochas exposta, areia, gravilha ou outro material semelhante com pouca ou nenhuma vegetação.	7	2
Outras herbáceas	Vegetação plantada para fins estéticos, lúdicos ou de controle de erosão	8	6
Pastagem/feno	Áreas dominadas por vegetação plantada e destinada à alimentação humana (legumes) ou gado.	8	5
Floresta de folha caduca	Áreas onde 75% ou mais das árvores perdem a folhagem simultaneamente.	10	3
Floresta mista	Áreas cujas árvores não são em 75% ou mais caducas nem perenes.	10	3
Floresta perene	Áreas onde 75% ou mais das árvores mantêm a folhagem todo o ano.	10	3

Org. dos autores.

O mapa de cobertura e uso do solo foi elaborado em meio digital, com base na imagem do satélite Landsat-5, sensor TM (*Thematic Mapper*), da órbita 214/65, com resolução espacial de 30 m. A data de passagem da cena do satélite foi do dia 26 de agosto de 2006. Os elementos presentes nas imagens foram identificados e associados utilizando a composição 3R, 4G e 5B. Imagens mais recentes desse e de outros satélites disponibilizados pelo INPE não foram utilizadas devido à grande cobertura de nuvens na área de estudo. Outras fontes de auxílio para a elaboração desses mapas foram às imagens do Google Earth versão 5.0.1 e idas a campo.

## RESULTADOS

A profundidade do lençol freático da BRG é rasa, variando, nos 27 poços de monitoramento, entre 0,9 m e 20,5 m, com média de 5,5 m. A partir desses dados, foram gerados cinco intervalos de profundidade da zona não saturada (D) para o período chuvoso e seco na área de estudo. A Tabela 4 mostra a profundidade da zona não saturada do aquífero e seus respectivos pesos e áreas para o período chuvoso. Nela, verifica-se que 61,7% da área da BRG está inserida no intervalo entre 4,6 m – 9,1 m, o que representa uma vulnerabilidade à contaminação moderada da água subterrânea do aquífero. Uma maior vulnerabilidade à contaminação foi constatada em 30,48% da área da BRG, inserida no intervalo de profundidade entre 1,5 m – 4,6 m.

Tabela 4 - Profundidade da zona não saturada do aquífero da BRG com seus intervalos, pesos e áreas no período chuvoso.

INTERVALOS DO D (M)	Dr	Dr × Dw (5)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
< 1,5	10	50	0,09	0,01
1,5 – 4,6	9	45	179,58	30,48
4,6 – 9,1	7	35	363,48	61,69
9,1 – 15,2	5	25	45,34	7,69
15,2 – 20,5	3	15	0,63	0,11

Org. dos autores.

Para o período de estiagem, a profundidade da zona não saturada do aquífero apresentou uma maior amplitude em relação ao período chuvoso, variando entre 1,5 m – 30,5 m, como mostra a Tabela 5. Nesse período, o aquífero estava mais protegido em relação ao período chuvoso, devido à maior espessura da camada não saturada do solo. Verifica-se, ainda na Tabela

5, que 59,6% da área do aquífero livre da BRG possui profundidade da zona não saturada maior que 9,1 m para o período de estiagem, representando, devido a maior espessura do material que constitui a zona não saturada, uma maior proteção a uma possível carga de contaminantes gerada na superfície.

Tabela 5 - Profundidade da zona não saturada do aquífero da BRG com seus intervalos, pesos e áreas no período de estiagem.

INTERVALOS DO D (M)	Dr	Dr × Dw(5)	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
1,5 – 4,6	9	45	0,76	0,13
4,6 – 9,1	7	35	237,7	40,27
9,1 – 15,2	5	25	313,7	53,24
15,2 – 22,9	3	15	36,29	6,16
22,9 – 30,5	2	10	1,12	0,19

Org. dos autores.

Os valores de recarga (R), obtidos para cada poço monitorado da bacia, variaram entre 13,9 mm/ano e 190,5 mm/ano. A partir desses dados, foram definidos quatro intervalos de recarga, distribuídos entre <51 mm/ano, 51 – 102 mm/ano, 102 – 178 mm/ano e 178 – 190 mm/ano.

Os fatores A (material do aquífero) e I (material da zona não saturada) do DRASTIC para a BRG foram baseados nas mesmas condições, já que não existem diferenças na constituição geológica e hidrogeológica da área de estudo. Cinco Formações Geológicas compõem a bacia hidrográfica, são elas: a Barreiras, a Beberibe, a Granitóides, a Sertânia e os Depósitos Fluvio-Marinhos.

No fator tipo de solo (S), foi constatada uma alta variabilidade em seus índices devido a sua composição litológica. De modo geral, quanto mais argiloso o solo, menos vulnerável será o aquífero, pois a percolação de materiais contaminantes é mais lenta. Seis tipos de solos foram identificados na área de estudo,

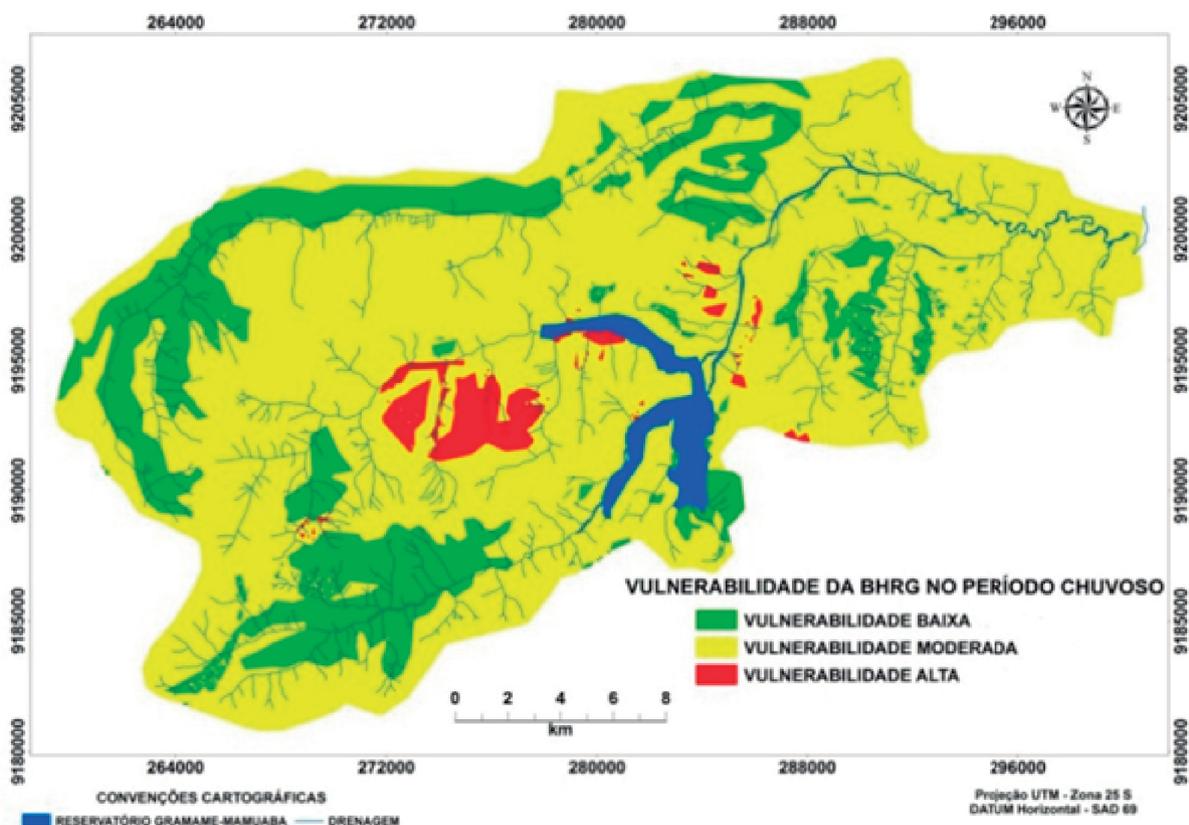
são eles: os Latossolos, os Neossolos Distróficos/Aluviais, os Gleissolos Hidromórficos/Distróficos, os Luvisolos Vermelho Amarelo Eutrófico, os Argissolos Vermelho Amarelo e os Organossolos Turfosos.

Na topografia (T), verificou-se que grande parte da bacia hidrográfica apresenta baixa declividade, inferior a 6%.

Cinco classes de condutividade hidráulica, variando entre 0,35 m/dia e 64,2 m/dia, foram consideradas neste estudo. Os dados extrapolados de condutividades hidráulicas dos 33 pontos indicam que pouco mais de 80% da área da BRG possui condutividade hidráulica variando entre 4,1 m/dia e 28,5 m/dia.

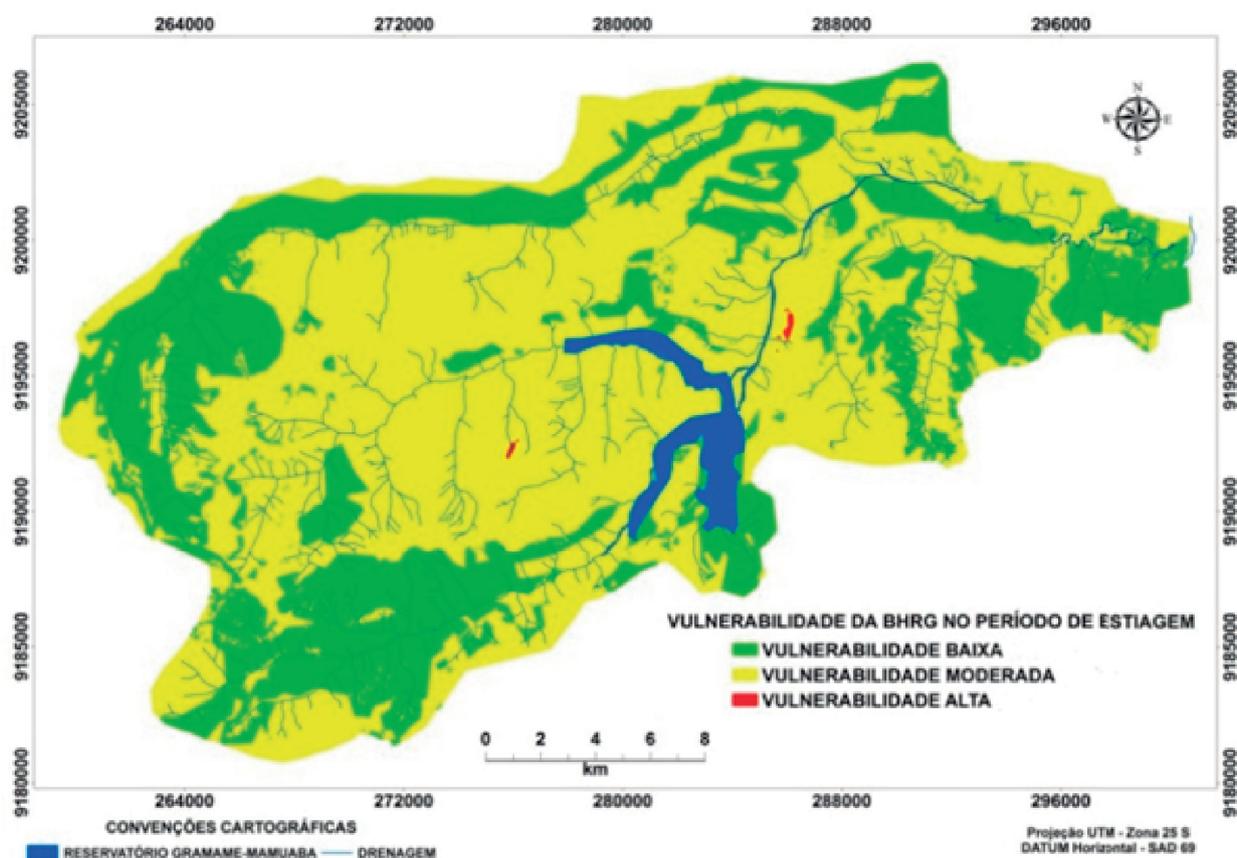
A partir dos resultados obtidos através dos sete fatores analisados na aplicação da metodologia DRASTIC, foi possível elaborar os mapas de vulnerabilidade do aquífero livre da BRG para os dois períodos. A Figura 3 mostra o mapa gerado para o período chuvoso, enquanto que a Figura 4 mostra o mapa gerado para o período de estiagem.

Figura 3 – Mapa de vulnerabilidade do aquífero livre da BRG no período chuvoso.



Org. dos autores.

Figura 4 – Mapa de vulnerabilidade do aquífero livre da BRG no período de estiagem.



Org. dos autores.

Para o período chuvoso, os valores dos índices de vulnerabilidade do aquífero livre da BRG variaram entre 46 e 179. Com esses dados, foram definidas três classes de vulnerabilidade: baixa, moderada e alta. Observa-se, na Figura 3, que a vulnerabilidade moderada corresponde à maior parte da área de estudo. Essa vulnerabilidade moderada foi obtida devido à formação geológica, constituída de argilas e outros materiais que dificultam a infiltração de contaminantes. Outro fator responsável por essa vulnerabilidade foi a maior profundidade da zona não saturada do aquífero, característico do período de baixa precipitação na região.

As regiões que apresentaram baixa vulnerabilidade do aquífero estão inseridas nas Formações Sertânia e Granitóides, constituídas de rochas cristalinas. Essas Formações servem como uma barreira natural contra os contaminantes provenientes da superfície. Além disso, nessa região, a profundidade

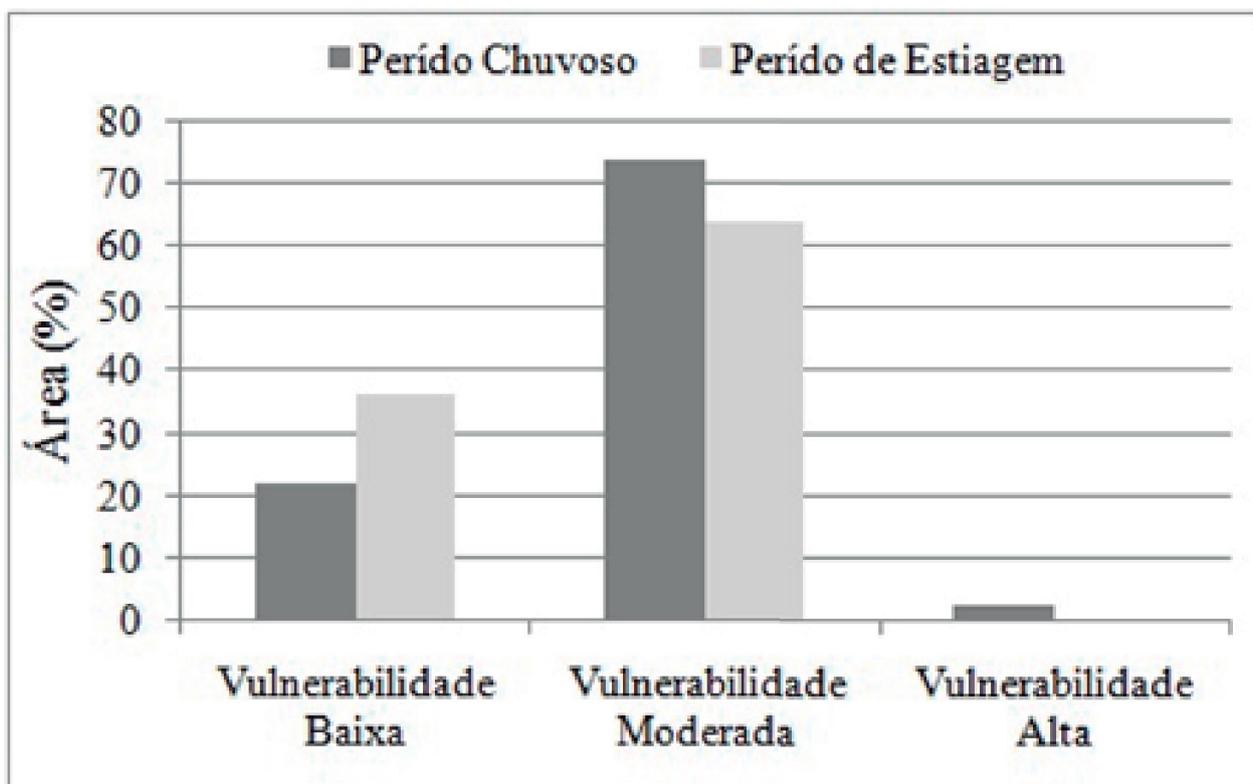
do lençol freático é maior. As áreas que apresentaram alta vulnerabilidade estão localizadas no centro da bacia hidrográfica. Elas são constituídas de solos arenosos, elevada condutividade hidráulica e níveis estáticos próximos à superfície, o que facilita a infiltração de contaminantes. Na Figura 5, observa-se que 73,4% da área estudada apresenta, para o período chuvoso, vulnerabilidade moderada à contaminação, com índice DRASTIC variando entre 121 - 159. As áreas da bacia hidrográfica de baixa vulnerabilidade e alta vulnerabilidade para esse período, por sua vez, correspondem a 22,0% e 2,6%, respectivamente.

No período de estiagem, a vulnerabilidade do aquífero livre da BRG variou entre 38 e 161. Nesse mesmo período, a área estudada apresentou basicamente apenas duas classes de vulnerabilidade, a baixa e a moderada, pois a classe de vulnerabilidade alta foi quase insignificante, com apenas 0,06% da área,

como pode ser visualizado nas Figura 4 e Figura 5. A classe de vulnerabilidade baixa corresponde a 36,2% da área (Figura 5). Nos locais dessa classe, a espessura da camada não saturada do solo e os tipos de materiais condicionam a baixa infiltração de água para a subsuperfície, já que predominam as Formações Sertânia e

Granitóides, os níveis estáticos mais profundos e os materiais constituídos de areia, silte, argila e rochas fraturadas. A Figura 5 mostra ainda que, para o período de estiagem, 63,71% da área apresenta vulnerabilidade à contaminação moderada, com índice DRASTIC variando entre 121 a 159.

Figura 5 – Vulnerabilidade nos períodos chuvoso e de estiagem por área da BRG.



Org. dos autores.

Observa-se, na comparação entre os resultados obtidos da vulnerabilidade para período chuvoso e de estiagem, que a BRG é mais vulnerável no período chuvoso (2,6% de área considerada como de alta vulnerabilidade) do que no período de estiagem (0,06% de área considerada como de alta vulnerabilidade), devido, principalmente, à baixa profundidade da camada não saturada do aquífero.

### **Mapa de Risco de Contaminação**

Na área de estudo existem diversas formas de uso e ocupação do solo, sendo que algumas podem ser

potenciais fontes de contaminação. Práticas agrícolas que utilizam fertilizantes com fontes nitrogenadas, além da existência de fossas sépticas e cemitérios na área urbana.

Essas mudanças no uso e ocupação do solo da região são constantes, devido, principalmente, ao rodízio de culturas realizadas pelos agricultores locais. Nesse rodízio de culturas, destaca-se a alternância das culturas da cana-de-açúcar e do abacaxi. Além da ocupação por essas duas culturas há áreas com solos parcialmente descobertos e pastos. A Figura 6 mostra a distribuição espacial do uso e ocupação do solo da BRG para o ano de 2010.

A Tabela 8 apresenta os valores considerados no estudo para a cobertura e o uso do solo da BRG, com as respectivas classes e áreas. A área ocupada pela agricultura corresponde a 51,74% da área da BRG. Essas áreas apresentam grande risco de contaminação para o aquífero estudado, pois as culturas existentes, na grande maioria, necessitam de nutrientes à base de nitrogênio, fósforo e potássio para o seu desenvolvimento.

As áreas comerciais, industriais e residenciais com alta e baixa densidade, que representam 11% da área da bacia hidrográfica, também são consideradas de alto risco de contaminação. As cargas contaminantes geradas pelo lançamento *in natura* no solo podem atingir, por percolação, o lençol

freático. As cargas de nitrato e outros compostos químicos também podem comprometer a qualidade das águas subterrâneas através de processos de lixiviação.

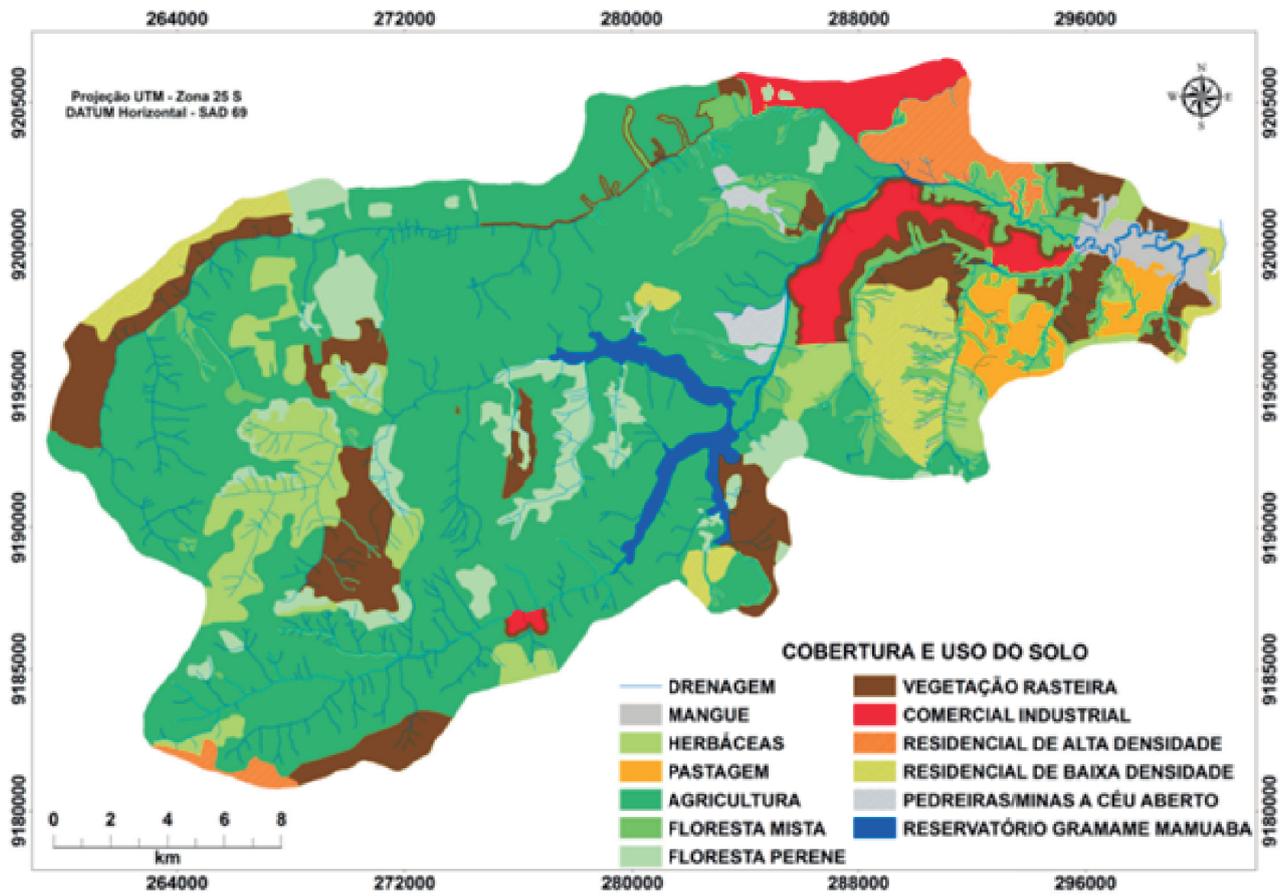
Para gerar o mapa de risco de contaminação foi utilizada a profundidade da camada não saturada do aquífero do período chuvoso, por esse ter apresentado uma maior vulnerabilidade. Com o resultado da modificação do DRASTIC, considerando o uso e cobertura do solo, foram identificadas cinco classes de maior risco à contaminação do aquífero livre da BRG, são elas: baixo, moderado, alto, muito alto e extremo. A distribuição espacial dessas classes pode ser visualizada na Figura 7 e quantificada na Tabela 9.

Tabela 8 - Uso e cobertura do solo com respectivos pesos e índices.

COBERTURA DO SOLO/USO DO SOLO	LCr*	LCr × LCw(2)**	LUr***	LUr × LUw(3)****	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
Pastagem	8	16	5	15	11,55	1,95
Comercial Industrial	1	2	10	30	22,52	3,81
Floresta Mista	10	20	3	9	44,92	7,6
Floresta Perene	10	20	3	9	36,36	6,15
Herbáceas	8	16	6	16	41,29	6,98
Agricultura	6	12	7	21	305,89	51,74
Pedreira/Minas a Céu Aberto/Sobreira	6	12	5	15	4,84	0,82
Residencial de Alta Densidade	2	4	8	24	13,65	2,31
Residencial de Baixa Densidade	4	8	7	21	26,42	4,47
Vegetação Rasteira	5	10	7	21	67,39	11,4
Mangue	1	2	1	3	7,17	1,21
Água	2	4	1	3	9,33	1,58

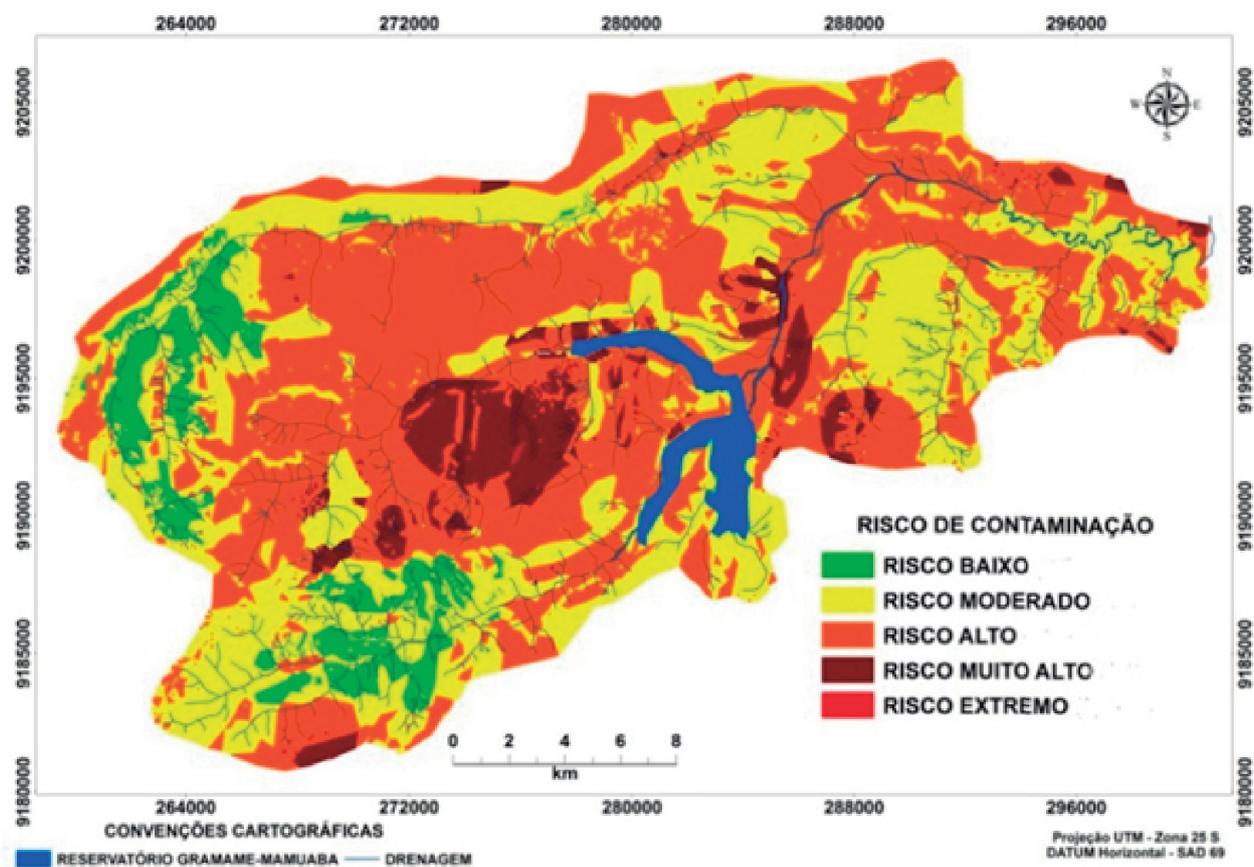
Org. dos autores.

Figura 6 – Mapa de uso e ocupação do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Gramame.



Org. dos autores.

Figura 7 - Mapa das classes de Risco de Contaminação da BRG.



Org. dos autores.

O mapa de risco de contaminação, que leva também em consideração os fatores antrópicos devido à inclusão dos mapas de uso e ocupação do solo, mostra que a região central, sudoeste e leste da bacia hidrográfica apresentaram risco de contaminação muito alto devido às áreas de agricultura e aos fatores naturais, como: presença de rochas sedimentares, baixa profundidade do nível estático e elevada condutividade hidráulica. Na Tabela 9, que mostra as áreas de risco à contaminação da BRG, mais da metade, cerca de 55,8%, apresentaram risco de contaminação alto, muito alto e extremo. Nessas áreas estão localizados: o Distrito Industrial e alguns outros bairros da cidade de João Pessoa, da cidade do Conde e da cidade de

Pedras de Fogo; além das agrovilas e áreas agrícolas com cultivos da cana-de-açúcar e do abacaxi.

As áreas com risco moderado representam 35,6% da bacia. Essas áreas estão situadas nas regiões de aluviões, onde os níveis estáticos estão muito próximos à superfície. São áreas também compostas por Neossolos, que não apresentam barreiras naturais contra os contaminantes, e se encontram normalmente em regiões planas, o que facilita a infiltração.

As áreas com risco baixo à contaminação das águas subterrâneas correspondem a 8,6% da bacia hidrográfica. Essas classes estão localizadas nas Formações Sertânia e Granitóides, que apresentam baixa permeabilidade devido à constituição geológica.

Tabela 9 – Áreas de risco de contaminação do aquífero livre da BRG.

ÍNDICE DRASTIC MODIFICADO	RISCO DE CONTAMINAÇÃO	Área (km <sup>2</sup> )	Área (%)
65 – 120	BAIXO	50,23	8,55
121 – 159	MODERADO	209,08	35,59
160 – 179	ALTO	288,36	49,09
180 – 199	MUITO ALTO	39,48	6,72
200 – 206	EXTREMO	0,11	0,02

Org. dos autores.

## CONCLUSÕES

A avaliação da vulnerabilidade do aquífero livre da bacia hidrográfica do rio Gramame, 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. A partir da aplicação desse método, constatou-se que o aquífero livre da BRG é mais vulnerável no período chuvoso do que no período de estiagem, devido a um maior potencial de recarga das águas subterrâneas registrada nesse período, o que influenciou no aumento do nível estático do aquífero.

Pôde-se afirmar que as áreas da bacia hidrográfica que apresentam maior vulnerabilidade no período chuvoso estão localizadas na região central, com a classe alta e muito alta, devido à predominância de solo arenoso, topografia plana, maior potencial de recarga do aquífero e camada mais delgada da zona não saturada do solo. As duas últimas tiveram uma maior influência no aumento da vulnerabilidade no período chuvoso, pois o nível estático médio nesse período foi de 5,57 m, enquanto que no período de estiagem foi de 9,77 m. Juntamente com o material da zona não saturada do solo, esses dois fatores também possuem maiores pesos na equação do DRASTIC.

Na aplicação do DRASTIC modificado, com a inserção dos fatores uso e cobertura do solo, foi possível identificar uma mudança nas áreas de maiores riscos à contaminação da BRG. De maneira geral, as áreas de vulnerabilidade alta passaram para a classe de risco à contaminação muito alta, e as áreas de vulnerabilidade moderada passaram para a classe de risco à contaminação alta. O aumento do risco à contaminação é resultante, principalmente, da dinâmica no processo agrícola e a

consequente modificação no uso do solo da região.

Os resultados apresentados permitirão o estabelecimento de protocolos para a criação de condições mais favoráveis para a proteção das águas subterrâneas da BRG, priorizando áreas específicas de proteção e estratégias para o monitoramento do aquífero livre local. Auxiliando, 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. Vale ressaltar que o índice de vulnerabilidade, a rigor, não compreende o estudo da probabilidade de ocorrência de um evento, mas sim o potencial de contaminação existente.

## 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

ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F.; MONTEIRO, F. A. J.; OLIVEIRA FILHO, J. S. Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA *Anais...* v. 2, p. 753-760, 1988.

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-600/2-85/018, 1987.

- ALMASRI, M. N. Assessment of intrinsic vulnerability to contamination for Gaza coastal aquifer, Palestine. *Journal of Environmental Management*, v. 88, p. 577-593, 2008.
- ANTONAKOS, A. K.; LAMBRAKIS, N. J. (2007). 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. *Journal of Hydrology*, v. 333, p. 288-304, 2007.
- AUGE, M. Vulnerabilidad de acuíferos. *Revista Latino-Americana de Hidrogeologia*, v. 4, p. 85-103, 2004.
- 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, p. 127-140, 2005.
- BARBOSA, J. A.; SOUZA, E. M.; LIMA FILHO, M. F.; NEUMANN, V. H. A. Estratigrafia da Bacia Paraíba: uma reconsideração. *Estudos Geológicos*, v. 13, p. 89-108, 2003.
- BASTIDA, J. J. M.; ARAUZO, M.; VALLADOLID, M. Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: the risk of nitrate pollution. *Hydrogeology Journal*, v. 18, p. 681-698, 2009.
- 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, p. 242-255, 2009.
- COELHO, V. H. R. *Monitoramento e análise da variação do nível d'água para estimativa da recarga do aquífero livre da bacia do rio Gramame – PB*. 2011. 146 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.
- COELHO, V. H. R.; ALMEIDA, C. N.; SILANS, A. M. B. P. 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*, v. 17, n. 2, p. 241-252, 2012.
- CUTRIM, A. O.; CAMPOS, J. E. G. Aplicação dos métodos Drastic e Posh para a determinação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do aquífero Furnas na cidade de Rondonópolis-MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 15, n. 2, p. 127-142, 2010.
- DENNY, S. C.; ALLEN, D. M.; JOURNEAY, J. M. DRASTIC-Fm: a modified vulnerability mapping method for structurally controlled aquifers in the southern Gulf Islands, British Columbia, Canada. *Hydrogeology Journal*, v. 15, p. 483-493, 2007.
- EIMERS, J. L.; WEAVER, J. C.; TEEZUIOTTI, S.; MIDGETTE, R. W. *Methods of rating unsaturated zone and watershed characteristics of public water supplies in North Carolina, U.S.* Geological Survey: Water-Resources Investigations Report 99-4283, 2000. 31 p.
- EMBRAPA. *Reconhecimento de solos do Nordeste. Levantamento exploratório – Reconhecimentos de solos do Estado da Paraíba*. Recife: Embrapa Solos/UEP, 1972. Disponível em: <<http://www.uep.cnps.embrapa.br/solos/index.php?link=pb>>. Acesso em 25 de maio de 2011.
- FOSTER, S.; HIRATA, R. Riscos de poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. *Anais...* p. 175-185, 1988.
- FURRIER, M.; ARAÚJO, M. E.; MENESES, L. F. Geomorfologia e tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. *Geologia USP Série Científica*, v. 6, p. 61-70, 2006.

- HAVERKAMP, R.; ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J.; PARLANGE, J. Y. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, v. 30, p. 2931-2935, 1994.
- HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A (Org). *Hidrogeologia: conceitos e aplicações* Rio de Janeiro: CPRM/LABHID, p. 405-424, 2008.
- 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*, v. 440, p. 14-23, 2012.
- JAMRAH, A.; AL-FUTAISI, A.; RAJMOHAN, N.; AL-YAROUBI, S. Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment. *Hydrogeology Journal*, v. 18, p. 126-138, 2007.
- LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILO, R.; SORIA UGALDE, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. *Soil Science Society of America Journal*, v. 70, p. 521-532, 2006.
- LOBO FERREIRA, J. P.; OLIVEIRA, M. M. *Desenvolvimento de um inventário das águas subterrâneas de Portugal: Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos e mapeamento DRASTIC da vulnerabilidade dos aquíferos de Portugal*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Relatório 179/93), 1993.
- MAIA, P. H. P. Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, v. 15, n. 2, p. 29-40, 2011.
- 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, p. 101-109, 2010.
- NOBRE, R. C. M.; ROTUNNO, O. C.; MANSUR, W. J.; NOBRE, M. M. M.; COSENZA, C. A. N. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 94, p. 277-292, 2007.
- 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: *Água subterrânea: aquíferos costeiros e aluviões, vulnerabilidade e aproveitamento*. Org. por Cabral, J. J. S. P.; Lobo Ferreira, J. P. C.; Montenegro, S. M. G. L.; Costa, W. D. Recife, Editora Universitária – UFPE, v.1, 2004. 447p.
- PARALTA, E.; FRANCÉS, A. 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*, n. 14, p. 27-35, 2000.
- PDRH. *Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Gramame*. SEMARH/SCIENTEC, 2000.
- POLEMIO, M.; CASARANO, D.; LIMONI, P. P. Karstic aquifer vulnerability assessment methods and results at a test site (Apulia, Southern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 9, p. 1461-1470, 2009.
- RAHMAN, A. A. GIS based DRASTIC model for assessing groundwater vulnerability in shallow aquifer in Aligarh, India. *Applied Geography*, v. 48, p. 88-102, 2007.

RIBEIRO, D. M.; ROCHA, W. F.; GARCIA, A. J. V. Vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos da sub-bacia do rio Siriri, Sergipe. *Águas Subterrâneas*, v. 25, n. 1, p. 91-102, 2011.

ROSEN, L. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. *Ground Water*. v. 32, p. 278-285, 1994.

RUEDA, O. M.; BETANCUR, T. V. Evaluación de la vulnerabilidad del agua subterránea en el Bajo Caucaantioqueño. *Avances en Recursos Hidráulicos*, v. 13, p. 71-87, 2006.

RUPERT, M. G. Calibration of the DRASTIC ground water vulnerability mapping method. *Ground Water*, v. 39, p. 630-635, 2001.

SECUNDA, S.; COLLIN, M. L.; MELLOUL, A. J. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal Environmental Management*, v. 54, p. 39-57, 1998.

STIGTER, T. Y.; RIBEIRO, L.; CARVALHO, D. A. M. M. Evaluation of an intrinsic and a specific vulnerability assessment method in comparison with groundwater salinisation and nitrate contamination levels in two agricultural regions in the south of Portugal. *Hydrogeology Journal*, v. 14, p. 79-99, 2006.

TARGINO, D. F. (2012). *Análise espaço-temporal da qualidade da água subterrânea da bacia do rio Gramame/PB*. 2012. 128 fls. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.