



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

TESE DE DOUTORADO

MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS
CÁRSTICOS: EXEMPLOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS
DOS RIOS VERDE, JACARÉ E SALITRE, BAHIA, BRASIL

DANILO HEITOR CAIRES TINOCO BISNETO MELO

SALVADOR
2017

**MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS
CÁRSTICOS: EXEMPLOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS
DOS RIOS VERDE, JACARÉ E SALITRE, BAHIA, BRASIL**

Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto Melo

Orientador: Prof. Dr. LUIZ ROGÉRIO BASTOS LEAL

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

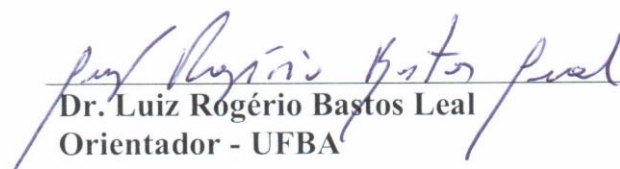
SALVADOR
2017

DANILO HEITOR CAIRES TINOCO BISNETO

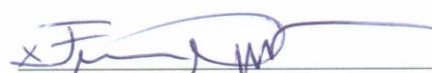
**“MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS
CÁRSTICOS: EXEMPLOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS
DOS RIOS VERDE, JACARÉ E SALITRE, BAHIA, BRASIL.”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos, defendida em 25/05/2017.

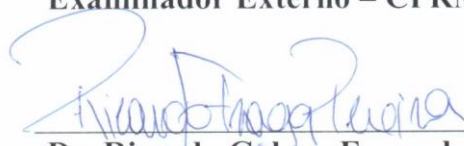
TESE APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:




Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Orientador - UFBA



Dr. Francisco Inácio Negrão
Examinador Externo – CPRM



Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araujo Pereira
Examinador Externo – UFBA



Dr. Pablo Santana Santos
Examinador Externo – UFBA



Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento
Examinador Interno – UFBA

Salvador – BA
2017

RESUMO

A exploração inapropriada da água subterrânea, associada ao uso inadequado do solo pode ocasionar na contaminação destes recursos, bem como afetar a dinâmica da paisagem, tornando imprescindível o estabelecimento de instrumentos de planejamento e gestão dos recursos hídricos subterrâneos. O objetivo da presente pesquisa trata da avaliação da vulnerabilidade intrínseca à contaminação de aquíferos cársticos localizados nas bacias hidrográficas dos rios Jacaré, Salitre e Verde, localizadas no Estado Bahia. Esta avaliação baseia-se em métodos quantitativos indexadores, onde são indexados valores as variáveis analisadas, como geologia, pedologia, geomorfologia, uso e ocupação do solo, profundidade do aquífero. No final da década de 1980 foi proposto um método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos, de modo geral. Todavia, as regiões cársticas apresentam peculiaridades que devem ser consideradas, e no final da década de 1990, aparecem os primeiros métodos de avaliação da vulnerabilidade para estes aquíferos. A maioria destes métodos foram desenvolvidos para atender necessidades locais, podendo ser reaplicados em outras áreas, desde que tenham as informações necessárias. Todavia, a disponibilidade da informação pode ser uma barreira para a aplicabilidade do método. Desta forma, esta pesquisa apresenta a aplicação de dois métodos consagrados de avaliação a vulnerabilidade a contaminação de aquíferos, o GOD e o EPIK, e depois propõem uma nova hierarquização dos parâmetros os quais foram sintetizados num novo método de avaliação da vulnerabilidade, com base na potencialidade das ferramentas de análise morfométrica e processamento digital de imagens inseridas no Sistema de Informação Geográfica, como o índice de posição topográfica e o índice de vegetação. Este método foi aplicado nas Bacia Hidrográficas do rio Jacaré e Verde, Bahia; sendo uma importante ferramenta para gestão das águas subterrâneas, colaborando para o manejo e gestão ambiental, visando à manutenção dos recursos hídricos subterrâneos em excelente estado para as atuais e futuras gerações.

Palavras-chave: Vulnerabilidade a contaminação de aquíferos. Aquífero cárstico. Índice de vegetação. Índice de posição topográfica.

ABSTRACT

The inappropriate exploitation of groundwater, associated to the inadequate use of the ground can cause in the contamination of these resources, as well as affect the dynamics of the landscape, making essential the establishment of instruments of planning and management of the underground water resources. The objective of this research is the evaluation of the vulnerability intrinsic to the contamination of karstic aquifers located in the hydrographic basins of the Jacaré, Salitre and Verde rivers, located in the State of Bahia. This evaluation is based on quantitative indexing methods, where the variables analyzed are indexed, such as geology, pedology, geomorphology, soil use and occupation, aquifer depth. In this sense, in the late 1980s a method was proposed to assess the vulnerability of aquifers in general. However, the karstic regions present peculiarities that must be considered, and in the late 1990s the first methods of vulnerability assessment for these aquifers appear. Most of these methods have been developed to meet local needs and can be reapplied in other areas, provided they have the necessary information. However, the availability of information may be a barrier to the applicability of the method. In this way, this research presents the application of two methods of assessing the vulnerability to contamination of aquifers, GOD and EPIK, and then proposes a new hierarchy of the parameters which have been synthesized in a new vulnerability assessment method, based on the potential of morphometric analysis tools and digital image processing inserted in the Geographic Information System, such as the index of topographic position and vegetation index. This method was applied in the Hydrographic Basin of the Jacaré and Verde river, Bahia; and in turn represents an important tool for groundwater management, collaborating for environmental management and administration, aiming at the maintenance of groundwater resources in excellent condition for current and future generations.

Keywords: Vulnerability to contamination. Karst groundwater. Vegetation index. Topographic position index.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1–INTRODUÇÃO	7
CAPÍTULO 2 -ARTIGO I – AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SALITRE, BA	32
CAPÍTULO 3 - ARTIGO II: PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE Á CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS CÁRSTICOS: ESTUDO DE CASO A REGIÃO CÁRSTICA DO RIO VERDE E JACARÉ, BA, BRASIL	54
CAPÍTULO 4–CONCLUSÕES	77
ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA	79

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de disponibilidade limitada, essencial à vida, ao desenvolvimento e bem-estar social, mas grande parte está nos oceanos ou congelada. Além disso, sua distribuição não é feita de forma regular, de modo que ele é escasso em algumas regiões. Como na região semiárida baiana, em especial no ambiente cárstico, há pouca rede de drenagem superficial, e as existentes são sobreexploradas (exploração excessiva, não-sustentável), principalmente para o abastecimento humano, irrigação e dessedentação.

Para minimizar esta deficiência na região, a sociedade civil tem adotada duas formas de exploração:

- Por construção de pequenos reservatórios superficiais, que proporciona o acúmulo de água;
- Por perfuração de poços tubulares profundos.

No entanto, a exploração inapropriada associado ao uso inadequado do solo pode ocasionar a contaminação destes recursos, bem como afetar a dinâmica da paisagem cárstica. Como relatado nos estudos de Ramos et al. (2007), na região de Irecê (BA), que apontaram o rebaixamento do lençol freático devido à extração excessiva da água subterrânea. Na cidade de Lapão (BA), a exploração demasiada da água subterrânea, atrelada ao lançamento de esgotos in natura e de águas servidas que não são coletadas por sistemas públicos de esgotamento sanitário, causaram o surgimento de fissuras e subsidências (MAIA; DIAS NETO; CORRÊA-GOMES, 2010).

Estes fatos são consequências da falta, ou adequação, de um planejamento territorial que respeite os limites e a capacidade de absorção dos impactos antrópicos. Por outro lado, isto denota que o Poder Público vem perdendo a capacidade de implementar os modelos de gestão territorial dinâmicos, que acompanhem as mudanças ambientais.

Neste sentido, o princípio 13 da Conferência de Estocolmo, em 1972, ao tratar do planejamento racional dos recursos, dispõe que para melhorar as condições ambientais, os Estados deveriam adotar um enfoque coordenado para que o desenvolvimento estivesse compatibilizado com a necessidade de proteger e melhorar o meio ambiente humano (ONU, 1972). Com base nessa ideia, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento definiu o desenvolvimento sustentável como aquele que “atende as necessidades do presente sem comprometer as necessidades das gerações futuras.” (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E O DESENVOLVIMENTO, 1991). O que significa desenvolvimento com conservação do meio ambiente.

Esse princípio deve ser compreendido como um conjunto de instrumentos preventivos que possam afetar as práticas econômicas, científicas, educacionais e conservacionistas, buscando a realização do bem-estar da sociedade. Deve haver uma compatibilização da atividade econômica com a proteção do meio ambiente.

De fato, a exploração econômica deve ocorrer nos limites da capacidade do ambiente, resguardando a renovação dos recursos naturais e a sua exploração não predatória, preservando para as presentes e futuras gerações. Para tanto, houve a necessidade da implantação de bases teóricas, conceituais e metodológicas que entendam a sua complexidade. Assim, o ambiente passou a ser visto com um sistema, capaz de compreender as diversas entidades que o compõem, analisando a sua organização, estrutura espacial, funcionalidade, interação e hierarquização.

Neste sentido, surge um modelo de gestão, denominado de “desenvolvimento sustentável”, que visa conciliar os conflitos e implementar uma nova relação sociedade-natureza, tendo como base regulatória três princípios básicos:

“A) a eficácia, referente a nova racionalidade de poupança de recurso e incorporação de informações e tecnologia nos produtos e processos; B) a valorização da diferença, referente à identificação e potencialização das vantagens competitivas de cada território; e C) a descentralização, constituindo uma nova forma de governo em parceria.”

(BECKER; EGLER, 1996, p 5).

Desta maneira, fica claro que para a compreensão do sistema ambiental faz-se necessário o manuseio de uma grande quantidade de dados/informações de diversas naturezas, organizando-os convenientemente a fim de permitir que diferentes interações possam ser realizadas. Para isto, é necessário o uso de um sistema computacional, denominado de Sistema de Informação Geográfica que permite reunir, introduzir, armazenar, recuperar, transformar e cartografar dados geográficos sobre o mundo real com o fim de satisfazer múltiplos propósitos.

A partir do entendimento dos princípios e conceitos que fundamentam os assuntos apresentado, o objetivo desta tese é fornecer uma contribuição metodológica ao mapeamento da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos cárstico, por meio do desenvolvimento de um instrumento auxiliar para gestão territorial. Este instrumento, denominado de Banco de Dados Geográficos, compõem-se de uma base de dados georreferenciadas e de um sistema de informação geográfica.

1.1. REFERENCIAL TEÓRICO

As primeiras décadas pós Segunda Guerra Mundial foram preconizadas por renovações, com efeito imediato sobre a forma de pensar e analisar as interações do homem com o meio ambiente. Para atingir este objetivo, os países promoveram a valorização das atividades primárias e exploração de recursos naturais, ensejando mudanças econômicas e sociais, com exploração desenfreada destes recursos, revelando a fragilidade do nosso planeta e o estado policrísico que se encontra a sociedade mundial.

Diante disto, eclodiu uma nova percepção sobre o “ambiente”, com reflexões aglutinadas sobre o nome de paradigma ‘ecológico’ (JØRGENSEN, 2012), introduzindo, gradativamente, novos princípios metodológicos relacionadas “as maneiras de se conceber a estruturação e funcionamento dos fenômenos da natureza e como a sociedade se relaciona com ele. Propõe-se com isso, o desenvolvimento da abordagem e método sistêmicos. Sua conceituação, apesar do fácil entendimento, se mostra de difícil aplicação, ao passo que se destaca, basicamente, por ser a relação entre o plano completo (o todo) e entre um conjunto de procedimentos que se relacionam e objetivam uma dada organização, ou até mesmo a organização das funções que se encontram em sequência e interdependentes de acordo com sua finalidade.

Embora o termo “sistema”, propriamente dito, não tivesse sido realçado, a história desse conceito evidencia importantes nomes: Gottfried Leibniz (1646-1716), que expunha a visão sistêmica sob a designação de Filosofia Natural; Cusa (1404-1461) e Hermann Hesse (1877-1922), que entendiam o funcionamento do mundo a partir de um jogo abstrato construído junto à visão sistêmica (BERTALANFFY, 1968; DRACK; APFALTER;

POUVREAU, 2007; DRACK, 2009). A análise sistêmica, portanto, nasce da ligação e inter-relação dos elementos e um objetivo comum, que é entender e explicar a totalidade.

Esta abordagem sistêmica permite conferir que o ambiente apresenta uma estabilidade (equilíbrio dinâmico), decorrente de constantes modificações, que são caracterizadas pela transferência de energia e matéria. Ross (1990) ressalva a atuação antagonica de duas forças ou fontes de energia – as forças endógenas (internas) e as forças exógenas (externas).

Com base nesta noção de estabilidade, Christofolletti (2002) relata dois aspectos importantes: o de resistência, que reporta a capacidade de uma unidade fisiográfica, por exemplo, em permanecer inabalada; e a resiliência referente a habilidade do sistema em retornar às suas condições originais após ser afetado.

O nível de resposta do ambiente perante as mudanças ocasionadas por estes fatores reporta a noção de sensibilidade. Por outro lado, a capacidade de reação ou disposição de suscetibilizar às mínimas ações, refere-se à suscetibilidade.

Neste sentido, a Geociência se apropria destes preceitos para investigar a fisiografia do relevo, com destaque para os trabalhos de Aleksandrova e Perobrazhenskiv (1988), Becker e Egler (1996) Beroutchachivili e Bertrand (1977), Beroutchachivili e Clopes (1977), Bertrand (1968), Chorley e Kenndy (1971), Crepani et al. (2001), Lindeman (1942), Tricart (1977), Sotchava (1978), Haase (1989), Troppmair (1983) e Verstappen e Van Zuidan (1969), que analisam as características dinâmicas e a evolução da paisagem, descrevendo os fatores condicionantes ou modeladores do ambiente. Ao analisar estes trabalhos, percebe-se a presença de alguns pontos em comum, como: a ideia de unidade e globalidade; homogeneidade e heterogeneidade; a paisagem é o reflexo da sinergia dos

elementos fisiográficos que a compõem; há uma dinâmica témporo-espacial distinta entre os elementos fisiográficos.

Arelada a estes estudos, surgiu uma linha de pesquisa relacionada a implantação de atividades socioeconômicas que avalia a probabilidade de ocorrência de um impacto (positivo ou negativo, social ou natural), com alterações e inter-relações espaciais e temporais, denominada de vulnerabilidade (CHRISTOFOLETTI, 2002, DAUPHINE; PROVITOLLO, 2013; EGLER, 1996; ZWAHLEN, 2003).

Na hidrogeologia, esta linha de pesquisa pauta, principalmente sobre a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, com destaque para as investigações pioneiras de Albinet (1963, 1970), LeGrand (1964), Margat e Albinet (1965), Margat; Monition; Ricour (1967; 1968), Margat (1968), Taltasse (1972), Vladimirskij (1960, apud VÍAS; ANDREO; PERLES, 2008), Vrana (1984), Vuillaume (1966), Walker (1969) e Zanoni (1972). Estes trabalhos estabelecem os conceitos básicos da avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, considerando-o como uma ferramenta preventiva, que permite determinar, a priori, a capacidade de proteção natural dos aquíferos e distinguir quais áreas necessitam de medidas mitigatórias e/ou reducionistas ao perigo de contaminação diante da intervenção antrópica. Para tanto, estes autores focam os perigos e ameaças de contaminação, contextualizando o meio ambiente.

Este tipo de pesquisa começou a ser bem vista pela comunidade científica, e em 1971 no simpósio internacional sobre aquíferos, realizada na cidade de Moscou (IAHS, 1975), promulgando os primeiros debates sobre esta temática.

Concomitante às evoluções científicas, eclodiu os sistemas automatizados. Pesquisadores discutiram amplamente a possibilidade de se adaptar estas “inovações”,

com o objetivo de representar (ou modelar) aspectos específicos do mundo real, numa base geograficamente referenciada, a partir de informações advindas de diversas fontes. Este sistema foi denominado de Sistema de Informação Geográfica – SIG (MELO et al, 2015).

Em pouco tempo o SIG se consolidou como ferramenta indispensável nos estudos hidrogeológicos, suprimindo as necessidades de gestão da informação geográfica, incorporando as inovações metodológicas, como a Geoestatística, Modelagem e o processamento digital de imagens (MELO et al, 2015). Estas inovações estão presentes também na aquisição e captura da informação geográfica, com aprimoramento constante. Aquisição reporta as melhorias na resolução espacial, temporal, radiométrica e espectral; e captura corresponde a disponibilidade da informação (internet/intranet).

Estas inovações auxiliaram na compreensão e distribuição da fisiografia do relevo. Com isto, na década de 1980, um grupo de pesquisadores coordenados por Linda Aller, propuseram um método para avaliar a vulnerabilidade intrínseca e específica à contaminação de aquífero, baseado na análise paramétrica-indexadores (ALLER et al., 1985). Utilizaram sete parâmetros relacionados com os mecanismos que envolvem o transporte dos contaminantes, sendo eles: profundidade do aquífero (**D**epth to groundwater), recarga do aquífero (net **R**echarge), material da zona saturada (**A**quifer media), pedologia (**S**oil media), declividade (**T**opography), material da zona não saturada (**I**mpacto of the vadose zone media) e condutividade hidráulica do aquífero (hydraulic **C**onductivity). Cada parâmetro é atribuído um índice para expressar o grau de vulnerabilidade (entre 1 e 10), que depois é multiplicado por um peso relativo (entre 1 e 5). O índice final é obtido somando os produtos de cada índice pelo respectivo peso, variando de 23 a 226. Quanto mais elevado o índice maior a vulnerabilidade.

Em 1987 a Agência de Proteção Ambiental dos EUA adota este método no planejamento e gestão territorial (ALLER et al., 1987), tornando-o conhecido, e aplicado, mundialmente. Esta concepção (paramétrica-indexador) ajudou a aprimorar o conhecimento sobre os elementos fisiográficos da paisagem, conduzindo ao desenvolvimento de outros métodos que:

- Reduziram a análise dos parâmetros hidrogeológicos, como AVI (STEMPVOORT; EWERT; WASSENAAR, 1992), CALVUL (TROIANO; MARADE; SPURLOCK, 1999), DART (DENNIS; DENNIS, 2012), DAT (ROSS, et al., 2004), FAVA (ARTHUR; et al., 2007), GOD (FOSTER, 1987), HYDRUS 1D (LINDSTRÖM, 2005), IVI (NOBRE; et al. 2007), PATHS (ORTEGA; MIRANDA, 2004), SGD (HÖITING; et al., 1995) e o método de Marcolongo e Pretto (1987);
- Modificaram a análise de alguns parâmetros, como DRISTPI (JIMÉNEZ-MADRID, et al., 2013), OREADIC (QIAN; et al., 2012) PATHS (ORTEGA; MIRANDA, 2004) e SINTACS (CIVITA; DE MAIO, 1997);
- Inseriram novos parâmetros, com o intuito de analisar a vulnerabilidade específica ou o risco potencial de contaminação, como a inclusão do mapa de uso e ocupação do solo (SECUNDA; COLLIN; MELLOUL, 1998; FRITCH, et al., 2000; PANAGOPOULOS; ANTONAKOS; LAMBRAKIS, 2006; GOMEZ DEL CAMPO; DICKERSON, 2007), características estruturais (RODRÍGUES, 2004; DENNY; ALLEN; JOURNEAY, 2007), propriedades dos contaminantes (WANG, et al., 2007), coeficiente de adsorção e argila (GUO, et al., 2007), tempo de retenção do contaminante (MAXE; JOHANSSON, 1998);

- Adequação para aquíferos específicos como o método EPIK (DÖRFLIGER; ZWAHLEN, 1996), aplicado em aquíferos cársticos.

Devido a importância dos aquíferos cársticos, o método EPIK influenciou o desenvolvimento dos métodos: COP (VÍAS; et al., 2006), DSWAP (BLODGETT, 1993), IRISH (DALY; DREW, 1998), KarstALEA (SCHMASSMANN; et al., 2012), KARSTIC (DAVIS; LONG; WIREMAN, 2002), PaPRIKa (DÖRFLIGER; PLAGNES; KAVOURI, 2009), PI (GOLDSCHIEDER et al., 2000), RESK (MALIK; SVASTA, 1999), RISK (DÖRFLIGER; 2005), RISKE (PETELET-GIRAUD; DÖRFLIGER; CROCHET, 2001), RISKE 2 (PLAGNES; et al., 2008). Por sua vez, o método COP foi aprimorado para o método COP-K (ANDREO; RAVBAR; VÍAS, 2009) e VUKA (LEYLAND; WITTHÜSER, 2010).

Diante de inúmeros artigos analisados sobre esta temática, constata-se a existência de duas vertentes: (a) Desenvolvimento de novas metodologias; (b) Aplicação destes métodos em áreas distintas.

CONCEITO TEÓRICO RELACIONADO À VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS

O conceito de vulnerabilidade é utilizado nas mais diversas áreas do conhecimento (da economia à geologia), portanto, sua definição “pode ser determinada em função de vários aspectos e seu significado se diversifica conforme o contexto onde se insere” (HIRATA; FERNANDES, 2008, pg. 405).

De acordo com Foster (2002), inicialmente o término “vulnerabilidade” foi utilizado sem definição formal, fazendo referência à possibilidade do aquífero em ser poluído por um contaminante. Consequentemente, alguns autores passaram a definir a expressão “vulnerabilidade à contaminação de aquíferos”, apresentando significados diferentes

(Quadro 1), ocasionando o surgimento de alguns sinônimos, por exemplo: sensibilidade, contaminação potencial, poluição potencial, risco de poluição, fragilidade, risco total entre outras. Para De Maio et al. (2001) e Hirata e Fernandes (2008) isto ocorreu por conta da diversidade e complexidade ambiental, da disponibilidade de informações; da finalidade da avaliação e da fonte contaminante.

QUADRO 1. ALGUMAS DEFINIÇÕES DE VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO

<p>Albinet e Margat (1971) – caracterização geológica e hidrogeológica para caracterizar a capacidade de infiltração e difusão de um contaminante no aquífero (tradução dos autores).</p> <p>Bachmat e Collin (1987) – Sensibilidade da qualidade da aquífero frente a atividades antrópicas, sendo caracterizadas como impróprias para uso (tradução dos autores).</p> <p>Daly e Warren (1998) – Análise das características geológicas e hidrogeológicas para determinar a sensibilidade dos aquíferos à contaminação por atividades antrópicas (tradução dos autores).</p> <p>Foster (1987) – Caracterização intrínseca das camadas que separam a zona saturada do aquífero da superfície do terreno, o qual determina sua sensibilidade a ser adversamente afetada por uma quantidade de contaminantes (tradução dos autores).</p> <p>Sotornikova e Vrba (1987) – habilidade do sistema em se proteger de modificações naturais ou humanas, que afetam suas características no tempo e espaço (tradução dos autores).</p> <p>Zaporozec (1989) – Vulnerabilidade: se passa normalmente na avaliação dos atributos que mais comumente se incluem nas características do solo, litologia, geológica, permeabilidade e profundidade da zona saturada. (tradução dos autores).</p>

A contaminação corresponde a presença de alguma substância estranha no meio ambiente, provocando degradação da qualidade ambiental de um ou mais elementos, ou seja, poluindo-o (AYALA, 1988).

A Cooperação Europeia de investigação científica e técnica (COST EU, 2001) apresenta um modelo simplificado da vulnerabilidade à contaminação de aquífero, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Modelo Simplificado de gestão ambiental.



Fonte: Adaptada: COST EU (2001).

Onde: **a fonte** refere-se ao tipo de contaminante. A Office of Technology Assessment (OTA), modificada por Manoel Filho (2008), é possível distinguir as seguintes fontes de contaminação:

- a) Fontes projetadas para recepção de substâncias;
- b) Fontes projetadas para armazenar, tratar ou receber substâncias;
- c) Fontes projetadas para reter substâncias durante transporte;
- d) Fontes produtoras de substâncias em virtude de outras atividades;
- e) Fontes que podem atuar como condutoras da água contaminada;
- f) Fontes naturais cuja descarga é criada pela atividade humana.

O contaminante é carregado e lixiviado, percolando a zona não saturada até atingir o aquífero. Este **percurso** é formado por elementos fisiográficos (topografia, geologia, edafologia, biogeografia, climatologia), o qual condicionam a capacidade do mesmo em degradar e/ou impedir a chegada dos contaminantes ao aquífero, **o alvo**. Desta forma,

este modelo pode ser considerado a premissa que fundamenta a avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos.

CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO

Civita e De Maio (1997) e Vrba e Zaporozec (1994) classificam a vulnerabilidade em:

- **Intrínseca** (ou natural): Expressa a vulnerabilidade do sistema aquífero por meio da caracterização de suas condicionantes (geológica, hidrogeologia, condições climáticas, biológicas), determinando o grau de fragilidade natural à contaminação;
- **Específica**: Analisa o impacto de um contaminante no ambiente, como os processos de absorção-adsorção, dissolução, precipitação e atenuação natural.

A vulnerabilidade específica oferece uma visão concreta do problema, pois considera os processos físico-químicos que o contaminante pode causar ao ambiente. Por outro lado, a vulnerabilidade intrínseca mostra uma visão global do problema, considerando a susceptibilidade fisiográfica à contaminação, mas aconselhável para a modelagem e compreensão do ambiente (DALY; WARREN, 1998; GOGU; DASSARGUES, 2000).

Em ambos os casos o resultado é a confecção de um único produto cartográfico, construído a partir de uma escala, ou índice, que expressa o grau de vulnerabilidade.

Para a representação cartográfica da vulnerabilidade, adotam-se os critérios da comunicação cartográfica, a qual busca associar às cores quentes e seus matizes (vermelho, laranja e amarelo) situações de emergência. Assim, a cor vermelha representa maior vulnerabilidade, enquanto que a cor amarela representa a de menor vulnerabilidade.

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS

Os procedimentos metodológicos e a definição das normas técnicas para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos estabelecem um conjunto de objetivos cartográficos exequíveis, centrados na avaliação de diversos parâmetros (ANDERSEN; GOSK, 1989). Todavia, não existe um “estado da arte” que avalie e compatibilize a complexidade destas integrações supracitadas.

Por conseguinte, De Maio et al. (2001) e Gogu e Dassargues (1998) classificam os métodos em:

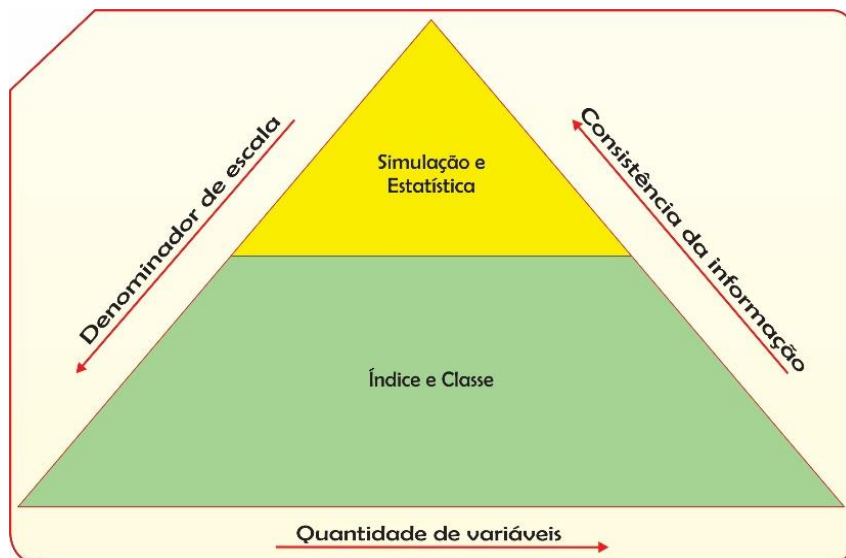
- **Simulação:** Com o intuito de prever o transporte de contaminantes, tanto no tempo como no espaço, por meio de simulações dos processos físico-químicos do movimento da água com o contaminante;
- **Estatísticos:** Incluem a descrição estatística das concentrações de um contaminante e a análise de regressão para incorporar os efeitos de distintas variáveis fisiográficas. O objetivo é descrever uma relação entre a qualidade da água e as características ambientais, por meio de variáveis independentes;
- **Índices e classes (ou paramétrico):** Baseia-se na combinação de diversas

variáveis que representam a vulnerabilidade intrínseca, com um campo definido e dividido em intervalos hierárquicos. A cada intervalo se admite um valor qualitativo, que refletem a susceptibilidade à contaminação.

Em síntese, as duas primeiras classes são recomendadas para avaliação da vulnerabilidade específica, as demais para a avaliação da vulnerabilidade natural.

Para auxiliar na escolha de qual método utilizar na avaliação a vulnerabilidade, De Maio et al. (2001) estabelecem uma correlação entre quantidade de variáveis, o denominador de escala e a consistência da informação, como ilustrado na Figura 2.

Figura 2. Relação entre três parâmetros fundamentais empregados para a confecção de um mapa de vulnerabilidade.



Fonte: Adaptada de De Maio et al. (2001).

O denominador de escala reporta ao nível de detalhes no mapa, apresentando um relacionamento inversamente proporcional a escala cartográfica. Ou seja, quanto maior o denominador, menor é a escala. A escolha da escala deve ser selecionada com base na

compatibilização cartográfica entre níveis de detalhe, ou generalização, previstos para o levantamento da informação e o mapa final.

A consistência da informação está relacionada à natureza das variáveis e às possíveis medições realizadas sobre elas. As variáveis são classificadas em qualitativa (permite nomear a informação, como por exemplo, aquífero cárstico, aquífero fissural), possibilitando descrever, comparar e interpretar as variáveis; e quantitativa (expressa em números mensuráveis), a qual utiliza a quantificação nas modalidades de coleta de informações e no seu tratamento, mediante técnicas estatísticas. Regularmente são utilizadas, quando se necessita garantir a precisão e exatidão dos resultados, evitando distorções interpretativas. Desta forma, as variáveis quantitativas apresentam uma maior consistência na análise das informações do que as variáveis qualitativas.

Nos estudos da fisiografia do relevo, as variáveis quantitativas são informações pontuais e tendem a ser onerosas e de tempo, tanto para a coleta em campo quanto para o seu tratamento. Por conseguinte, estudos de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos realizados com variáveis quantitativas tende a ser realizado em pequenas áreas, provavelmente para fins específicos (por exemplo, implantação de uma indústria petroquímica, posto de gasolina, usina de tratamento de resíduos), e conseqüentemente, necessita de um denominador de escala pequeno (elevado nível de detalhe), podendo ser analisado uma quantidade média de variáveis.

Por outro lado, quando se faz uma análise da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos por meio de variáveis qualitativas, como no uso da sobreposição de mapas temáticos (geológica, pedológica, morfológica) e variáveis quantitativas (profundidade do aquífero, condutividade hidráulica), emprega-se os métodos de índice e/ou classe. Existem vários métodos de índice e cada um analisa uma quantidade diversificada de

variáveis, como o GOD (utiliza apenas três variáveis) e o KDI (10 variáveis). A tabela 1 mostra alguns métodos e suas variáveis analisadas.

TABELA 1. MÉTODOS DE VULNERABILIDADE E VARIÁVEIS BÁSICAS

MÉTODO	Variáveis básicas														
	Precipitação	Topografia	Densidade da rede de drenagem	Edafologia			Propriedades físico-químicas	Conexão Hidrológica	Rede de recarga	Características da zona não saturada	Profundidade do nível piezométrico	Mudança do aquífero	Características hidrológicas	Condutividade hidráulica	Uso e ocupação do solo
				Espessura, textura e mineralogia	Umidade	Permeabilidade									
Vrana (1968)	X			X						X			X		
Albinet e Margat (1971)							X		X	X			X	X	
DRASTIC (ALLER; et al., 1985)		X		X					X	X	X		X	X	
Sotornikova; Vrba (1987)						X					X	X		X	
Marcolongo; Preto (1987)				X						X	X	X			
GOD - Foster (1987)										X	X		X		
Trojan e Perry (1988)	X	X				X			X	X	X		X		
GNDCI BASIC (CIVITA, 1990)							X			X	X		X	X	
ISIS (DE REGIBUS, 1994)		X		X		X			X	X	X		X		
SGD (HÖITING; et al., 1995)	X			X		X			X				X	X	
EPIK (DÖRFLIGER, 1996)		X		X		X			X				X		
KDI (BEYNEN; TOWNSEND, 2005)	X	X	X	X		X			X	X					X
KarstALEA (SCHMASSMANN; et al., 2012)		X	X	X				X	X	X			X	X	
MAIA (MAIA; CRUZ, 2011, 2013)		X		X					X	X	X		X	X	

Fonte: Atualizada de Civita e De Maio (1997) e Vías (2003).

1.2. FORMATO DA TESE

Conforme recomendações do Programa de Pós-Graduação em Geologia - PPGeo da Universidade Federal da Bahia esta tese está dividida em quatro capítulos. Sendo o capítulo 1, a introdução com referencial teórico sobre a temática abordada na tese; os capítulos 2 e 3 estão incluídos os artigos, intitulados por: “Avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da Bacia Hidrográfica do rio Salitre - BA” e “Proposta de método de avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos cársticos: estudo de caso a região cárstica da Bacia Hidrográfica do rio Verde e Jacaré, BA, BRASIL”. Esses

artigos estão no formato de submissão para a Revista Brasileira de Águas Subterrâneas e Anuário do Instituto de Geociências, periódico de circulação nacional de alta relevância entre profissionais e pesquisadores da temática águas subterrâneas. A revista proposta apresenta conceito CAPES B2, atendendo aos pré-requisitos estabelecidos pelo PPGE. No ANEXO A, encontram-se as regras de formatação de submissão da revista. O último capítulo, 4, reporta às conclusões da tese.

REFERÊNCIAS

- ALBINET, M. La pollution des eaux souterraines. **Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, DS 63 A 127, oct. 1963. 127 p.
- _____. Les cartes de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. **Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, 70 SGN 325 HYD, aug. 1970. 31 p.
- ALBINET, M.; MARGAT, J. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. In: SYMPOSIUM GROUNDWATER POLLUTION, aug. 1971, Moscou. **Proceedings...**Moscou: IAHS, 1971. p. 58-70.
- ALLER, L.; et al. Drastic: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. **Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory**, Oklahoma, EPA/600/2-85/018, may 1985. 177 p.
- ALLER, L.; et al. Drastic: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. **Research and Development**, Chicago, EPA/600/2-87/035, june 1987. 58 p.
- ANDERSEN, L. J.; GOSK, E. Applicability of vulnerability maps. **Environmental Geology and water sciences**. New York, v. 13, n. 1, p. 39-43. jan./feb. 1989.
- ANDREO, B.; RAVBAR, N.; VÍAS, J. M. Source vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers by extension of the COP method: application to pilot sites. **Hydrogeology Journal**. Cham, v.17, n. 3, p. 749-758, may, 2009.
- ARTHUR, J. D.; et al. Development and implementation of a bayesian-base aquifer vulnerability assessment if Florida. **Natural Resources Research**, Chan, v. 16, n. 2, p. 93-107, jun. 2007.
- AYALA, F. J. Introducción a los riesgos geológicos. In: Instituto Geologico y Minero de España – IGME. **Riesgos Geológicos**. Madrid: IGME, 1987. p. 3 – 19.

BACHMAT, Y.; COLLINS, M. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. In: VAN DUIJVENBOODEN, W. Van; WAEGENINGH, H. G. Van. (Eds.). **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants**: proceedings and information n° 38 of the International Conference held in the Netherlands. Amsterdam: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. 1143 p. 297-307.

BECKER, B. K.; EGLER, C. A. G. **Detalhamento da metodologia para execução do zoneamento ecológico-econômico pelo Estados da Amazônia Legal**. Brasília: SAE/MMA, 1996.

BEROUTCHACHVILI, N.; BERTRAND, G. Le Geosystème ou Système Territorial Naturel. **Revue Géographique des Pyrénées et du Ouest**. Toulouse. v. 49, n. 2, p. 167-180, 1978.

BEROUTCHACHVILI, N; CLOPES, J. M. P. Tendencia actual de la ciencia del paisaje en la Unión Soviética: El estudio de los geosistemas en la estación de Martkopi (Georgia). **Revista de Geografia**, Barcelona. v. 11, n. 1-2, p. 23-36, 1977.

BERTAFALANFFY, L. **General System Theory: foundations, development and applications**. New York: George Braziler, 1968.

BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale. Esquisseméthodologique. **Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-ouest**. Toulouse, v. 39, n. 3, p. 249-272, 1968.

BEYNEN, P.; TOWNSEND, K. A disturbance index for karst environments. **Environments Management**. Cham, v. 36, n. 1, p. 101-116, jul. 2005.

BLODGETT, R. Drinking water vulnerability assessment in Texas. In: 1993 ANNUAL CONFERENCE: MANAGEMENT AND REGULATIONS, june, 1993, Denver. **Proceedings...** Denver: AWWA, 1993. p. 589-597.

CIVITA, M. Cartografiadellavulnerabilitàdegliacquiferi: daglistudiconoscitiviall'applicazione normativa. Roma: IRSA, 1996.

CIVITA, M.; DE MAIO, M. **SINTACS: Unsistemaparametrico per la valutazione e la cartografiadelle vulnerabilitàdegliacquiferiall'inquinamento**. Metodologia e automatizzazione. Bologna: Pitagora Editrice, 1997.

CHORLEY, R.; KENNDY, B. **Physical Geography. A System Approach**. London: Prentice-Hall International, 1971.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E O DESENVOLVIMENTO. **Nosso futuro comum**. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, 1991, p. 46.

CREPANI, E.; et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: INPE, 2001. (INPE-8454-RPG/722).

DAVIS, A. D.; LONG, A. J.; WIREMAN, M. KARSTIC: a sensitivity method for carbonate aquifers in karst terrain. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 42, n. 1, may 2002. p. 65-72.

DALY, D.; DREW, D. The role of karst and karst vulnerability in the Irish groundwater protection scheme. In: VULNÉRABILITÉ ET PROTECTION DES EAUX KARSTIQUES, may, 1998. Neuchatel. **Workshop...** Neuchâtel: CHYN, p. 4, 1998.

DALY, D.; WARREN, W. P. Mapping groundwater vulnerability: the Irish perspective. In: ROBINS, N. S. (ed.) **Groundwater pollution: aquifer recharge and vulnerability**. London: Geological Society, 1998. p. 179-190.

DAUPHINÉ, A.; PROVITOLLO, D. **Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer**. 2^a ed. Paris: Armand Colin, 2013.

DE MAIO, M.; et al. **Linee-guida per la redazione e l'usodella carte dellavulnerabilitàdegliacquiferiall'inquinamento**. Roma: ANPLA, 2001.

DE REGIBUS, C. **Valutazione della vulnerabilitàdegliacquiferiall'inquinamento. Analisi e confronto delle metodologie: sperimentazione su aree – campione**. Tesi (Dottorato di Ricerca in Ingegneria Geologico-Ambientale) – Politecnico di Torino, Torino, 1994.

DENNIS, I.; DENNIS, R. Climate Change vulnerability index for South African aquifers. **Water SA**, v. 28, n. 3, p. 417-426, Special Edition, 2012.

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**. Liege: Springer, v. 15, n. 3, p. 483-493, may, 2007.

DÖRFLIGER, N. **Guide méthodologique cartographie de la vulnérabilité em vue de la délimitation des périmètres de protection en milieu karstique**. Orléans: Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 2005.

DÖRFLIGER, N.; PLAGNES, V.; KAVOURI, K. PaPRIKa a multicriteria vulnerability method as a tool for sustainable management of karst aquifers: example of application on a test site in SW France. In: INTERNATIONAL INTERDISCIPLINARY SCIENTIFIC CONFERENCE: SUSTAINABILITY OF THE KARST ENVIRONMENT, sept., 2009, Plitvice Lakes. **Proceedings...** Plitvice Lakes: UNESCO, 2009. p. 48-56.

DÖRFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. EPIK a metrodology for evaluating vulnerability of groundwater to contamination in karstic aquifer; its application on a test site in Swiss Jura. In: INTERNATIONAL SYMPSIUM AND FIELD SEMINARION: KARST WATERS & ENVIRONMENTAL IMPACTS, sept., 1995, Antalya. **Abstract...** Antalya: UKAM, 1995. p. 81-82.

DRACK, M. Ludwig von Bertalanffy's early system approach. **Systems Research and Behavioral Science**. v. 26, n. 5, p. 563–572, 2009.

DRACK, M.; APFALTER, W.; POUVREAU, D. On the making of a system theory of life: Paul A Weiss and Ludwig von Bertalanffy's conceptual connection. **The Quarterly Review of Biology**. v. 82, n. 4, p. 349–373, 2007.

EGLER, C. A. G. Risco ambiental como critério de gestão do território: uma aplicação à zona costeira brasileira. **Revista Território**. Rio de Janeiro, v. 1, n.1. p.31 - 41, jul./dez., 1996.

EUROPEAN COOPERATIONS IN THE FIELD OS SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH (COST EU). **Cost 620: vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers**. Luxembourg: European commission, 2001.

FOSTER, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: DUIJVENBOODEN, W.; WAEGENINGH, H. G. (Eds.). **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants**: proceedings and information n° 38 of the International Conference held in the Netherlands. Amsterdam: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69-86.

FOSTER, S.; et al. **Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environmental agencies**. Washington: World Bank Group, 2002.

FRITCH, T. G.; et al. A predictive modeling approach to assessing the groundwater pollution susceptibility of the Paluxy Aquifer, Central Texas, using a Geographic Information System. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 39, n. 9, p. 1063-1069, jul 2000.

GOGU, C. R.; DASSARGUES, A. Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic, Southern Belgium. **Hydrogeology Journal**. Liege: Springer, v. 8, n. 3, p. 337-345, jun., 2000.

_____. A short overview on groundwater vulnerability assessment: basic statements for use in the framework of the Cost 620 action. In: VULNÉRABILITÉ ET PROTECTION DES EAUX KARSTIQUES, may, 1998. Neuchatel. **Workshop...** Neuchâtel: CHYN, p. 4, 1998.

GOLDSCHIEDER, N.; et al. The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers. **ZeitschriftfürangewandteGeologie**. Stuttgart: Schweizerbart science publishers, v. 46, n. 3, p. 157-166 jul., 2000.

- GOMEZDELCAMPO, E.; DICKERSON, R. A modified DRASTIC model for siting confined animal feeding operations in Williams County, Ohio, USA. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 55, n. 8, p. 1821-1832, oct. 2008.
- GUO, Q.; et al. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 52, n. 5, p. 923-932, apr. 2007.
- HAASE, G. Medium scale landscape classification in the German Democratic Republic. **Landscape Ecology**. v. 3, n. 1, p 29-41, sep. 1989.
- HIRATA, R.; FERNANDES, A. J. Vulnerabilidade à poluição de aquíferos. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) **Hidrologia: conceitos e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Capítulo 5.4 p. 405-424.
- HÖLTING, B. et al. Concept for the Determination of the Protective Effectiveness of the Cover above the Groundwater against Pollution. **Geologisches Jahrbuch**, Stuttgart, v. 63, p. 6 – 65, 1995.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROLOGICAL SCIENCES (IAHS). **Symposium on groundwater pollution: 1971**. Rennes: IAHS, 1975. 240 p.
- JEANNIN, P. Y. et al. VULK: a tool for intrinsic vulnerability assessment and validation. In: CONFERENCE ON LIMESTONE HYDROLOGY AND FISSURED MEDIA, 7., sept. 2001, Besançon. **Proceedings...**Besançon: UFC, 2001. p. 185-190.
- JIMÉNEZ-MADRID, A.; et al. DRISTPI, a new groundwater vulnerability mapping method for use in karstic and non-karstic aquifers. **Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology**. London, v. 46, p. 2, p. 245-255, mar. 2013.
- JØRGENSEN, S. E. **Integration of Ecosystem Theories: a pattern**. Dordrecht: Springer, 2012.
- LEGRAND, H. E. System for evaluation of contamination potential of some waste disposal sites. **Journal American Water Works Association**, Denver, v. 56, n. 8, p. 959-974, aug. 1964.
- LEYLAND, R. C.; WITTHÜSER, K. T. VUKA: a modified COP vulnerability mapping method for karst terrains in South Africa. **Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology**, London, v. 46, p. 107-116, feb. 2010.
- LINDEMAN, R. L. The trophic dynamic aspect of ecology. **Ecology**, Washington, v. 23, n. 4, p. 399-418, oct. 1942.
- LINDSTRÖM, R. **Groundwater vulnerability assessment using process-based models. 2005**. Thesis (Phd in Engineering Science) - KTH Architecture and Built Environment, Stockholm, 2005.

MAIA, P. H. P.; CRUZ, M. J. M. Um novo método para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos. **Brazilian Journal for Aquatic Science and Technology**, Itajaí: Univali, v. 15, n. 2, p. 29-40, 2011.

_____. Proposta de modificações no método MAIA para avaliar a vulnerabilidade do aquífero Urucuia. **Cadernos de Geociências**, Salvador: IGEO, v. 10, n. 2, p. 15-157, nov. 2013.

MAIA, P. H. P.; DIAS NETO, B.; CORRÊA GOMES, L. C. Análise Geológica e Estrutural das Fissuras e Subsidências no Carste de Lapão. **Cadernos de Geociências**. Salvador? IGEO, v. 7, n. 2, p. 112-121, 2010.

MALIK, P.; SVASTA, J. REKS: an alternative method of karst groundwater bulnerability estimation. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL ASSOCIATION OF HYDROGEOLOGISTS, XXIX., sept. 1999, Bratislava. **Proceedings...** Bratislava: IAH, 1999. p. 79-85.

MANOEL FILHO, J. Contaminação das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) **Hidrologia: conceitos e aplicações**. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 5.3, p. 381-404.

MARCOLONGO, B.; PRETTO, L. **Vulnerabilitàdegliacquiferinellapianura a nord di Vicenza**. Veneza: C.N.R.-GR.NAZ.DIF.CATASTR.IDROGEOLOG., 1987.

MARGAT, J.; ALBINET, M. La pollutiondeseauxsouterraines par leseaux de surface. **Bureau de recherches geologiques et minières**, Orléans, DS 65 A 96, nov. 1965. 21 p.

MARGAT, J.; MONITION, L.; RICOUR, J. Eaux souterraines et pollutions radio-actives. **Bureau de recherches geologiques et minières**, Orléans, DS 67 A 132, oct. 1967. 7 p.

_____. Emploi des eauxsouterrainesencas de protection radioactive superficielle. **Bureau de recherches geologiques et minières**, Orléans, 68 SGL 153 HYD, oct. 1968. 13 p.

MARGAT, J. Vulnerabilité des nappes d'eausouterraine á la pollution: bases de la cartographie. **Bureau de recherchesgeologiquesetminières**, Orléans, 68 SGL 198 HYD, nov. 1968. 12 p.

MAXE, L.; JOHANSSON, P. O. Assessing groundwater vulnerability using travel time and specific surface area as indicators. **HydrogeologyJournal**, Heidelberg, v. 6, n. 3, p. 441-449, oct. 1998.

MELO, D. H. C. T. B.; SILVA, H. M.; BRITO, P. L.; MENEZES, L. A. Sistema de Informação Geográfica: uma análise sobre o desenvolvimento técnico, tecnológico, acadêmico e conceitual. **Revista MundoGEO**. Curitiba: MundoGEO, ano 17, n. 83, sept. 20015. (Conteúdo Complementar).

NOBRE, R. C. M.; et al. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool. **Journal of contaminant Hydrology**. New York, v. 94, n. 3-4, p. 277-292, dec. 2007.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Report of the United Nations conference on the human environment**. Stockholm: ONU. A/CONF.48/14/Rev.1. jun. 1972.

ORTEGA, R. M. V.; MIRANDA, W. R. Vulnerabilidade a la contaminación de las aguas subterráneas en los acuíferos cubanos. In: SEMINARIO-TALLER. PROTECCIÓN DE ACUÍFEROS FRENTE A LA CONTAMINACIÓN: PROTECCIÓN DE LA CALIDADE DEL AGUA, IV., 2004, Lima. **Anais...**Lima: CYTED, 2004.

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. **Hydrogeology Journal**. New York, v. 14, n. 6, p. 894-911, sep. 2006.

PETELET-GIRAUD, E.; DÖRFLIGER, N.; CROCHET, P. Multicriterion assessment of the vulnerability of karstic aquifers in Mediterranean area using the RISKE method (karst in the North part of Montpellier). In: CONFERENCE ON LIMESTONE HYDROLOGY AND FISSURED MEDIA, 7., 2001, Besançon. **Proceedings...**Besançon: UFC, 2001, p. 281-284.

PLAGNES, V. et al. Karst Vulnerability Mapping: Examples of Application of RISKE 2 Method. In: JOINT ANNUAL MEETING, oct. 2008, Houston. **Proceedings ...** Houston: GSA, 2008.

QIAN, H.; et al. Assessment of groundwater vulnerability in the Yinchuan Plain, Northwest China using OREADIC. **Environmental & Monitoring and Assessment**. Liege: Springer, v. 184, n. 6, p. 3613-3628, june 2012.

RAMOS, S.O.; ARAÚJO, H.A.; LEAL, L.R.B.; LUZ, J.A.G. e DUTTON, A.R. Variação temporal do nível freático do aquífero cárstico de Irecê - Bahia: contribuição para uso e gestão das águas subterráneas no semiárido. **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo: SBG, v 37, n. 4, p. 227-233, dez. 2007.

RODRÍGUEZ, R. C. The role of urban areas in aquifer vulnerability assessments: The Salamanca Mexico case. **Geofísica Internacional**, México, v. 43, n. 4, p. 583-589, dec. 2003.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia, ambiente e planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990.

ROSS, M.; et al. Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: A case study from the St. Lawrence lowlands, Canada. **Geofísica Internacional**. México, v. 43, n. 4, p 591-602, oct.-dec. 2004.

SCHMASSMANN, S.; et al. KarstALEA: a practical guide for the prediction of karst-related hazards in underground works. In: SWISS GEOSCIENCE MEETING, 10., nov., 2012. Bern. **Proceedings...**Bern: SC/NAT/UB, 2012. p. 425-426.

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 of Environmental Management**. New York, v. 54, n. 1, p. 39-57, sep. 1998.

SOTORNIKOVA, R; VRBA, J. Some remarks on the concept of vulnerability maps. In: DUIJVENBOODEN, W.; WAEGENINGH, H. G. (Eds.). **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants**: proceedings and information n° 38 of the International Conference held in the Netherlands. Amsterdam: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 471-475.

SOTCHAVA, V. B. **O estudo do geossistema**. São Paulo: USP, 1978 (Série Métodos em Questão).

STEMPVOORT, D.; EWERT, L. WASSENAAR, L. **AVI: A method for groundwater protection mapping in the Prairie Provinces of Canada**. Saskatoon: Environmental Sciences Division, National Hydrology Research Institute, 1992. (Prairie Provinces Water Board Report 114).

TALTASSE, P. **Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP)**. São Paulo: USP (Instituto de Geociências), 1972. (Publicação Avulsa, n. 1).

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: IBGE, 1977.

TROIANO, J.; MARADE, J.; SPURLOCK, F. Empirical modeling of spatial vulnerability applied to a norflurazon retrospective well study in California. **Journal of Environmental Quality**. Madison: ACSESS, v. 28, n. 2, p. 397-403, mar/april 1999.

TROJAN, M. D.; PERRY, J. A. **Assessing Hydrogeologic risk over large geographic areas**. Minneapolis: University of Minnesota, 1998.

TROPMAIR, H. Ecosistemas e geossistemas do estado de São Paulo. **Boletim de Geografia Teórica**. Rio Claro. v. 13, n. 25, p. 27-36, 1983.

VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J. P. Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos: aplicación en acuíferos kársticos y detríticos. In: ANDREO, A. (ed.) **Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos**. Madrid: IGME, 2008.

VÍAS, J. M. V.; et al. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karst) aquifers: the COP method. **Hydrogeology Journal**. Liege: Springer, v. 14, n. 6, p. 912 – 925, dez. 2006.

VRBA, J.; ZAPOREZEC, A. (Ed.). **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. Hannover: Heinz Heise Verlag, 1994.

VRANA, M. **Map of groundwater protection in Bohemia and Moravia**. Praha: Wat. Res. Plan Cent., 1968.

VUILLAUME, Y. Les conditions de l'épuration naturelle des eaux souterraines para les roches aquifers filtrantes (pollution para les microorganisms). **Bureau de recherches geologiques et minieres**, Orléans, DS 66 A 67, jun. 1966. 50 p.

WALKER, W. H. Illionois ground water pollution. **Journal American Water Works Association**. Washington: AWWA, v. 61, n.1, p. 31-40, jan. 1969.

WANG, Y.; et al. Vulnerability of groundwater in quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 53, n. 3, p. 479-484, nov. 2007.

ZANONI, A. E. Ground-water pollution and sanitary landfills – a critical review. **Ground Water**, Hoboken, v. 10, n. 1, p. 3-16, jan. 1978.

ZAPOROZEC, A. A. Hydrogeologic mapping for groundwater protection. In: Moore, J. E. et al. (Eds.). **Recent advances in groundwater hydrology**. Illinois: AIH, 1989. 588-597 p.

ZWAHLEN, F. (Ed.) **Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (Karst) aquifers: scope, goals results**. Luxembourg: Europeancommission, 2003.

CAPÍTULO II

ARTIGO I – AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SALITRE, BA

RESUMO

A avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação representa uma importante ferramenta para gestão dos recursos hídricos subterrâneos, pois permite identificar quais as áreas mais vulneráveis a contaminação na área em estudo. O presente artigo utilizou a metodologia GOD e EPIK de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação na Bacia Hidrográfica do rio Salitre, BA. Os resultados demonstraram que em ambos os casos os aquíferos cársticos apresentam alta vulnerabilidade à contaminação, sendo que o método salienta a importância de conservar as morfologias cársticas, uma vez que elas apresentam alta vulnerabilidade à contaminação.

Palavras-chave: vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, aquífero cárstico, análise espacial.

ABSTRACT

The assessment of the vulnerability of aquifers to contamination represents an important tool for the management of groundwater resources, since it allows identifying which areas are most vulnerable to contamination in the area under study. This article used the GOD methodology and EPIK assessment of the vulnerability of the aquifer to contamination in the basin of the river Salitre, BA. The results showed that in both methods, the karst aquifers have high vulnerability to contamination, and the method emphasizes the importance of preserving the karst morphologies, since they have high vulnerability to contamination.

Keywords: Vulnerability Assessment to contamination of aquifers, karst groundwater, spacialanalist.

INTRODUÇÃO

Questões relacionadas ao meio ambiente afligem toda a sociedade, tornando-se notícia cotidiana nos jornais de circulação nacional e internacional, principalmente quando o tema envolve a escassez hídrica. Diante deste quadro, uma alternativa foi explorar os recursos hídricos subterrâneos. No entanto, com os avanços decorrente da urbanização, do desenvolvimento industrial, das atividades agrícolas e mineradoras, os aquíferos estão sob perigo de contaminação.

Nesta perspectiva, algumas linhas de pesquisa buscam analisar a intervenção antrópica no ambiente, a fim de identificar áreas que apresentam maior susceptibilidade à contaminação. Uma linha de pesquisa é a que confere a noção de vulnerabilidade, de caráter preventivo, determinando a capacidade de proteção natural do ambiente, de modo a compatibilizar e monitorar as ações antrópicas, ao invés de remediá-las.

A vulnerabilidade, ou seja, a sensibilidade de um aquífero à poluição superficial está relacionada à ocorrência do processo natural de atenuação do contaminante no solo. O grau de atenuação é definido pelas características hidrogeológicas e geológicas intrínsecas de um sistema aquífero e do meio sobrejacente (DÖRFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

A avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquífero baseia-se no pressuposto de que a paisagem natural apresente algum nível de proteção ao aquífero contra a presença de contaminantes. O grau de proteção é definido pelas características intrínsecas da paisagem. Por isto, esta avaliação é considerada uma ferramenta

preventiva, que permite determinar, a priori, a capacidade de proteção natural dos aquíferos e distinguir quais áreas necessitam de medidas mitigatórias e/ou reducionistas ao perigo de contaminação diante da intervenção antrópica.

Aquíferos dessa natureza necessitam de uma atenção espacial no que concerne à sua proteção, pois são, geralmente, considerados muito vulneráveis à contaminação, devido à sua estrutural original altamente heterogênea. Podem também ser considerados como uma rede de condutos de alta permeabilidade cercado por grandes volumes de rocha de baixa permeabilidade (DÖRFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Existem vários métodos desenvolvidos para avaliar a vulnerabilidade à contaminação de um aquífero, de um sistema aquífero (CIVITA; DE MAIO, 1997; VRBA; ZAPOROZEC, 1994). Esta pesquisa visa avaliar a vulnerabilidade à contaminação do aquífero na Bacia Hidrográfica do rio Salitre, Bahia, baseado nos métodos GOD e EPIK, com o objetivo de auxiliar na criação de diretrizes no planejamento territorial, visando a conservação da água subterrânea.

As metodologias GOD e EPIK são considerados os primeiros passos na avaliação da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, e destinam-se, também, a priorizar, mas não substituir, ações sistemáticas de monitoramento e inspeção em campo (FOSTER, 1987)

ÁREA DE ESTUDO

A Bacia Hidrográfica do Rio Salitre (BHRS), cujo nome baseia-se no principal curso d'água da região, situa-se no Centro-Norte do Estado da Bahia, tendo como limites as bacias hidrográficas do rio Itapicurú, Jacaré, Paraguaçu, sub-médio São Francisco e margem direita do Lago de Sobradinho. O órgão executor da Política Estadual de

Recursos Hídricos, o Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (INEMA), estabelece que as BHRS correspondem a uma unidade de gestão denominada de Região de Planejamento e Gestão das Águas número XVII (INEMA, 2014).

A BHRS possui forma estreita e alongada, com área de aproximadamente 14.136 km², sendo formada, basicamente, por rios intermitentes. O rio Salitre nasce na comunidade conhecida como “Boca da Madeira”, em plena Chapada Diamantina, no município de Morro do Chapéu. Após percorrer 333,24 km, tem seu exutório exorréico no rio São Francisco, na comunidade de Campo dos Cavalos, no município de Juazeiro, a jusante da Barragem de Sobradinho (Figura 1).

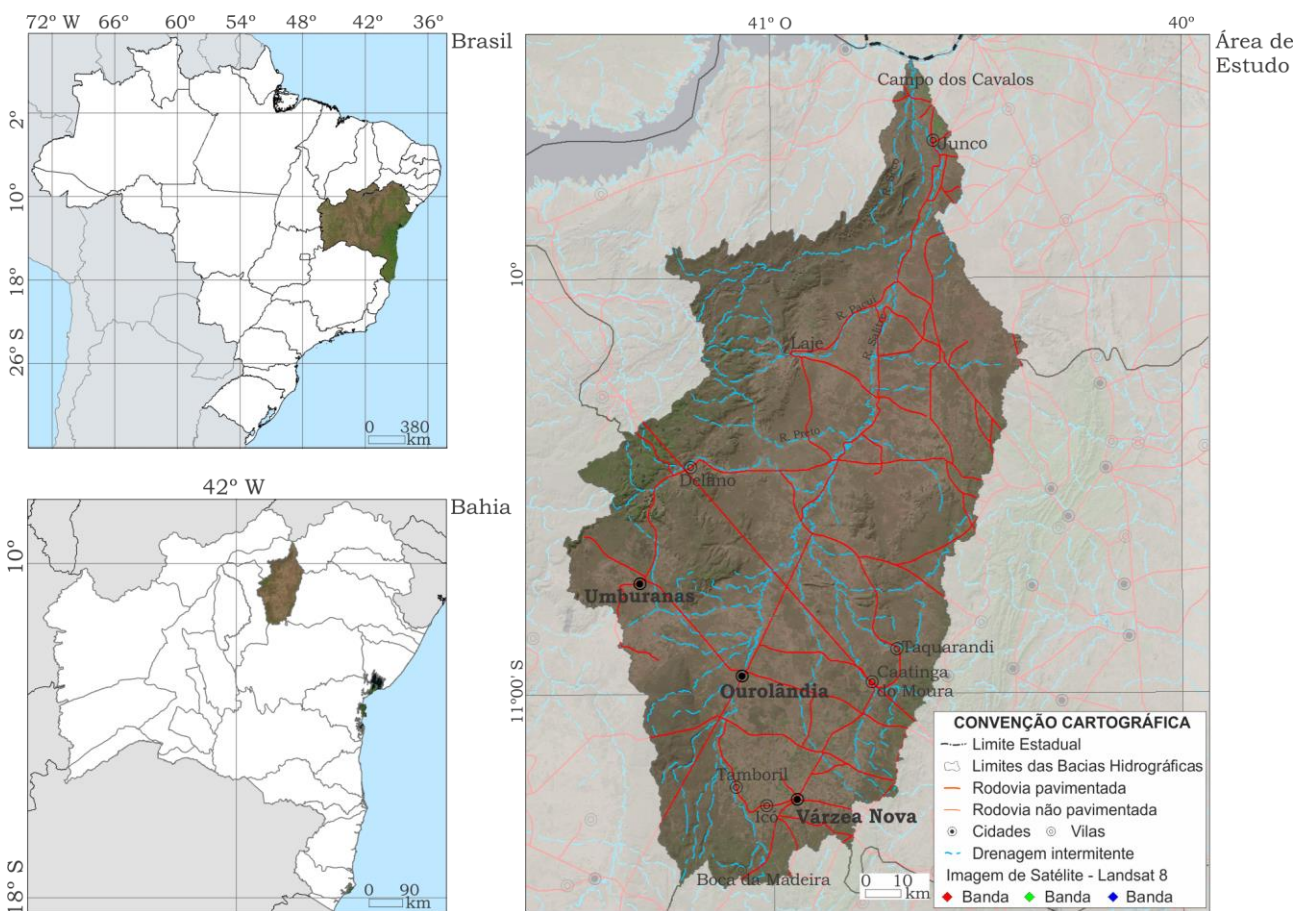


Figura 1. Bacia Hidrográfica do rio Salitre, Bahia.

ASPECTOS GEOLÓGICOS

A geologia da BHRS integra a parte nordeste do Cráton do São Francisco, sendo constituída por rochas do Paleoarqueano ao Neoproterozóico, em parte sobreposta pela cobertura sedimentar do Cenozóico (SILVA, 2006). No mapa da Figura 2 é possível observar a distribuição da geologia juntamente com suas respectivas Formações e Grupos.

Na BHRS ocorre uma interessante sequência de rochas e sedimentos carbonáticos que abrangem ao menos três unidades distintas originadas a partir da dissolução e reprecipitação dos carbonatos pré-cambrianos do Grupo Una (Formação Salitre): (1) calcários esbranquiçados heterogêneos da Formação Caatinga; (2) tufos calcários fossilíferos e (3) “areia” carbonática no leito das drenagens.

Os calcários localizados na BHRS foram interpretados por Branner (1911) como fácies distintas de um mesmo carbonato. Os estudos de Suguio, Barcelos e Matsui (1980) e Penha (1994) detalham a gênese e paleoambientes dos calcários da Formação Caatinga. Auler (1999) e Auler e Smart (2001) apresentaram elementos cronológicos e paleoambientais para estas unidades, notadamente os tufos calcários.

A carstificação do Una foi muito influenciada por estruturas geológicas regionais e outros condicionantes geológicos preexistentes, tais como falhas, diáclases, limites impermeáveis, e aos gradientes hidráulicos superficiais e subterrâneos que definiram as zonas de recarga, circulação e descarga do aquífero. Convém lembrar também que a carstificação desenvolveu-se em tempo geológico recente (provavelmente no Quaternário) e que o último evento tectônico que definiu o arcabouço estrutural da região e do vale do rio Salitre ocorreu no Neoproterozóico (BARBOSA; DOMINGUEZ, 1996).

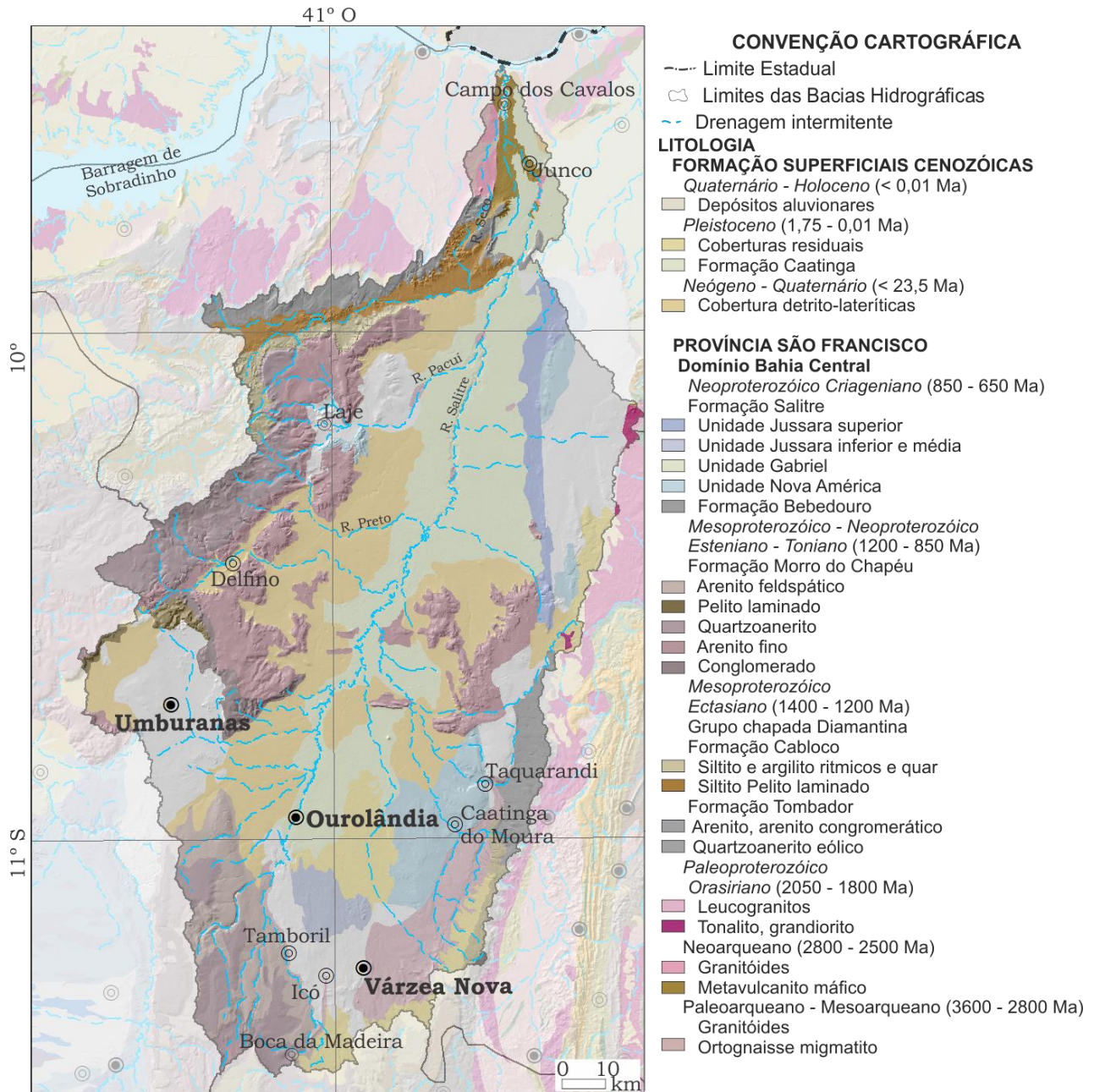


Figura 2. Mapa geológico Bacia Hidrográfica do rio Salitre, Bahia. Adaptado de Silva (2006).

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

De acordo com SILVA (2006), ocorrem três tipos de domínios aquíferos na BHRS: fissural, fissural-metassedimentar e cárstico (Figura 3); estando associados a um

respectivo domínio litoestratigráfico: embasamento cristalino, Grupo Chapada Diamantina e Grupo Una.

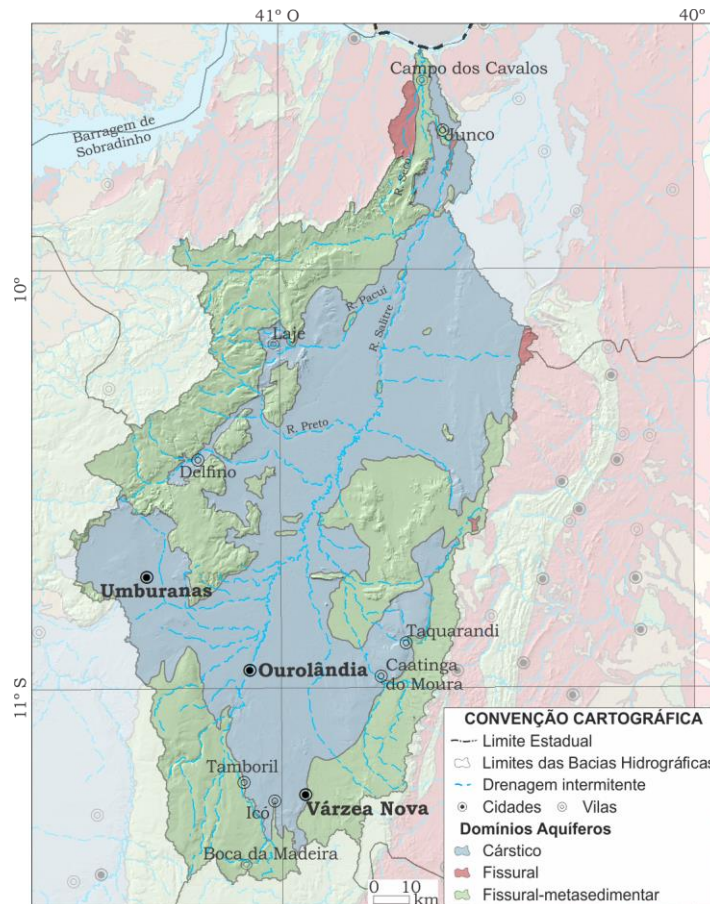


Figura 3. Domínios Hidrogeológicos.

O aquífero cárstico ocorre capeando as rochas do Grupo Chapada Diamantina em grandes áreas do vale e, ao norte, está diretamente assentado sobre as rochas da sequência vulcanossedimentar, ocupando, desta maneira, quase toda a porção central do vale do rio Salitre. É o principal aquífero do vale do rio Salitre e onde se encontram as principais reservas de água subterrânea. Os processos de carstificação atuaram nas rochas carbonáticas do Una diferencialmente, tanto lateralmente como em profundidade, tendo como resultado um aquífero muito heterogêneo e anisotrópico onde as suas características hidrogeológicas variam muito, tanto localmente como em nível regional (BASTOS LEAL; et al., 2005).

VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

Em hidrogeologia, o conceito de vulnerabilidade começou a ser difundido a partir da década de 1970, com as pesquisas de Albinet (1963, 1970), LeGrand (1964), Margat e Albinet (1965), Margat; Monition; Ricour (1967; 1968), Margat (1968), Vrana (1968), Vuillaume (1966) e Walker (1969), e de maneira mais ampla na década de 1980 (HAERTLE, 1983; ALLER; et al., 1985; FOSTER, 1987) estabelecendo os conceitos básicos da avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação. Estes estudos foram baseados na acessibilidade ao aquífero e na capacidade de atenuação dos elementos constituinte da paisagem, resultante da retenção físicoquímica ou da reação dos contaminantes com o ambiente. Esta atenuação da paisagem é denominada por Silva e Sanabria (2008) de sensibilidade do aquífero.

Neste sentido, NRC (1993) e Vrb e Zaporozec (1994), consideram que esta avaliação está associada as características intrínsecas das camadas subjacentes ao aquífero, tendo como produto o mapeamento da vulnerabilidade, servindo de base para o planejamento territorial e o controle no uso e ocupação do solo.

Para tanto, adota-se um modelo de gestão ambiental para verificar o risco de contaminação da água subterrânea. A Cooperação Europeia de investigação científica e técnica (COST EU, 2001) apresenta um modelo simplificado da vulnerabilidade à contaminação de aquífero, como ilustrado na Figura 3.



Figura 3. Modelo Simplificado de gestão ambiental. Fonte: Adaptada: COST EU (2001).

Onde: a fonte refere-se ao tipo de contaminante. A Office of Technology Assessment (OTA), modificada por Manoel Filho (2008), é possível distinguir as seguintes fontes de contaminação: (a) Fontes projetadas para recepção de substâncias; (b) Fontes projetadas para armazenar, tratar ou receber substâncias; (c) Fontes projetadas para reter substâncias durante transporte; (d) Fontes produtoras de substâncias em virtude de outras atividades; (e) Fontes que podem atuar como condutoras da água contaminada; (g) Fontes naturais cuja descarga é criada pela atividade humana.

O contaminante é carregado e lixiviado, percolando a zona não saturada até atingir o aquífero. Este percurso é formado por elementos fisiográficos (topografia, geologia, edafologia, biogeografia, climatologia), o qual condicionam a capacidade do mesmo em degradar e/ou impedir a chegada dos contaminantes ao aquífero, o alvo. Desta forma, este modelo pode ser considerado a premissa que fundamenta a avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos.

O MÉTODO GOD

O método GOD foi desenvolvido por Foster (1987) e aprimorado para atender as condições dos países americanos por Foster et al. (1988). Consiste na hierarquização de índices relativos à extrema ou baixa vulnerabilidade intrínseca do aquífero, com base nos mecanismos de recarga da água subterrânea e na capacidade natural de atenuação de contaminantes, variando conforme as condições geológicas. A Tabela 1 demonstra os fatores hidrogeológicos necessários e os normalmente disponíveis para executar este método.

TABELA 1 – FATORES HIDROGEOLÓGICOS QUE CONTROLAM A VULNERABILIDADE

Componente de Vulnerabilidade	Fatores hidrogeológicos	
	Idealmente necessários	Normalmente disponíveis
Inacessibilidade hidráulica	Grau de confinamento do aquífero	Tipo de confinamento da água subterrânea
	Profundidade do lençol freático	Nível estático
	Condutividade hidráulica vertical e teor de umidade da zona não saturada (zona vadosa) ou camada confinante	
Capacidade de Atenuação	Distribuição granulométrica dos sedimentos e fissuras na zona vadosa ou camada confinante	Grau de consolidação/fissuras desses estratos
	Mineralogia dos estratos na zona vadosa ou camada confinante	Característica desses estratos

Fonte: FOSTER et al., 2002.

Para tanto, este método se baseia na análise das três variáveis que a compõem: o confinamento hidráulico (*Groundwater occurrence*), características do estrato de cobertura (*Overall aquifer class*) e profundidade do aquífero (*Depth to groundwater*). Seu índice varia de 0,0 à 1,0, envolvendo alguns estágios distintos:

1. Identificação do tipo de confinamento do aquífero, refletindo o seu nível de contato a superfície terrestre. Com indexação num intervalo de 0,0 à 1,0;
2. Indexação dos estratos de cobertura, situado acima da zona saturado do aquífero, incide sobre o grau de consolidação e do tipo de litologia, com valores entre 0,4 à 1,0. Este estrato condicionam o tempo de deslocamento dos contaminantes e os vários processos de sua atenuação;
3. Estimativa da profundidade do lençol freático, com valores entre 0,6 e 1,0. Este parâmetro corresponde à distância que o contaminante terá de percorrer para atingir a zona saturada do aquífero. Importante destacar que para as rochas carbonáticas seu valor é constante (1,0).

A Figura 4 produz o diagrama para quantificar cada uma das variáveis, com algumas modificações em relação à versão original, como reflexo dos resultados obtidos com experiências de aplicação desse método (FOSTER et al., 2002). O índice final integral de vulnerabilidade do aquífero é o produto da multiplicação dos três índices.

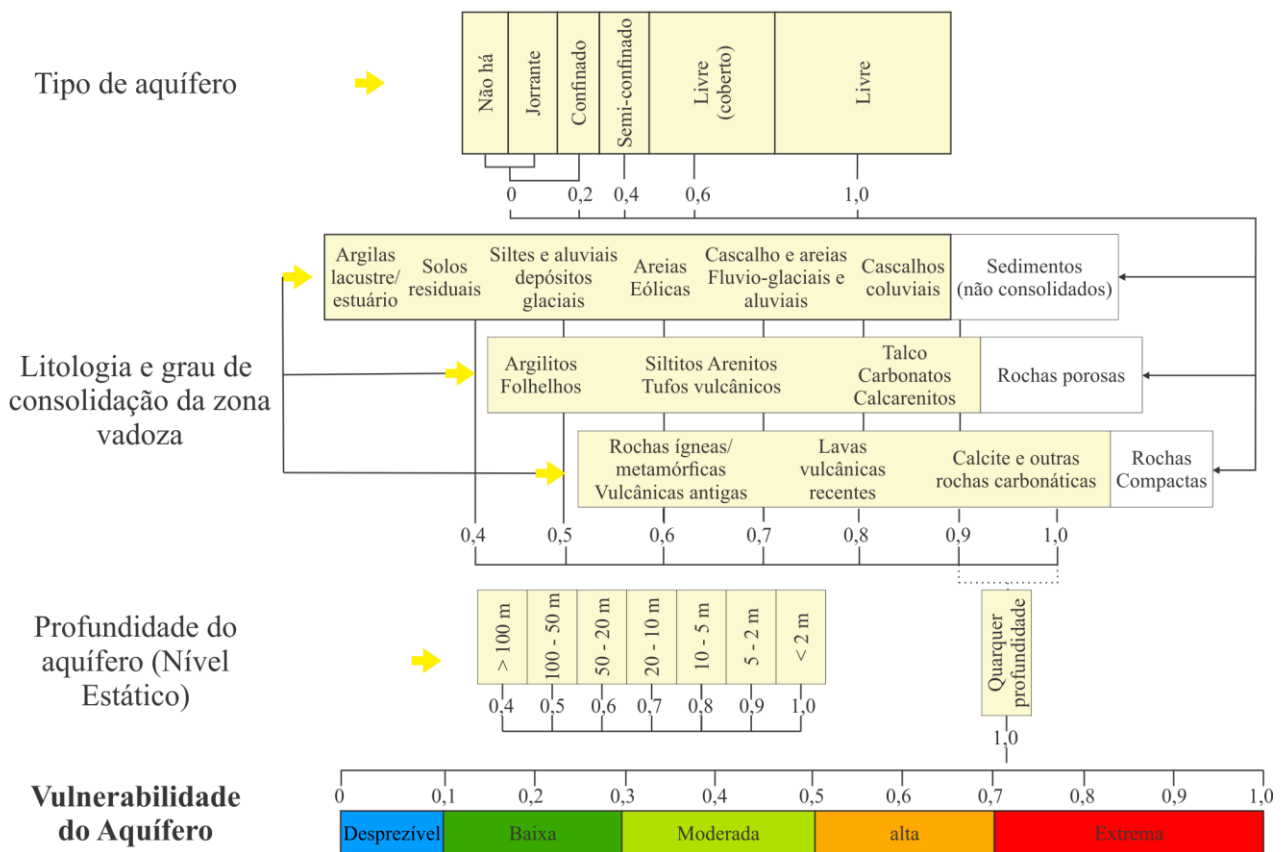


Figura 4. Diagrama do método GOD. Fonte: Adaptada de Foster et al. (2002).

O MÉTODO EPIK

O método EPIK foi desenvolvido por Dörfliiger e Zwahlen (1997), especificamente para ser empregado em regiões cársticas, executando uma análise ponderada de 4 variáveis que caracterizam o grau de proteção num aquífero cárstico, sendo eles: Epicárstico (Epikarst), cobertura de proteção (Protective cover), condições de infiltração (Infiltration conditions) e desenvolvimento da área cárstica (Karst network development).

De acordo com os autores, a ponderação dos parâmetros visa atribuir um fator de proteção ao aquífero, ao invés de aferir sua vulnerabilidade. Assim, os parâmetros são ponderados com quatro fatores e somados entre si para obter o índice de vulnerabilidade intrínseca, sendo calculado mediante a seguinte expressão:

$$IP: \alpha E_e + \beta P_p + \gamma I_i + \delta K_k$$

Onde ip: índice de proteção; E_e , P_p , I_i e K_k correspondem aos valores dos parâmetros EPIK; α , β , γ e δ são os fatores de ponderação. Dörflioger e Zwahlem (1997) propõem os seguintes valores:

$$\alpha = 3 \quad \beta = 1 \quad \gamma = 3 \quad \delta = 2$$

A Tabela 2 apresenta os valores de cada variável do método EPIK.

TABELA 2. DESCRIÇÃO E VALORES DAS VARIÁVEIS DO MÉTODO EPIK

Categoria	Descrição	Valor
Variável: E – epicárstica		
E ₁	Red cárstica típica (dolinas, depressões, cavidades...	1
E ₂	Quando a superfície carstificada apresenta lineamentos (vales secos, alinhamentos de dolinas...)	2
E ₃	Ausência de morfologia epicárstica	3
Variável: P – cobertura de proteção		
P ₁	Solo com espessura inferior à 20 cm	1
P ₂	Solo com espessura 20 à 100 cm	2
P ₃	Solo com espessura 100 à 800 cm	3
P ₄	Solo com espessura superior à 800 cm.	4
Variável: I – condições de infiltração		
I ₁	Regiões com infiltração direta (sumidouros, rede de drenagem (perene ou intermitente).	1
I ₂	Zonas com declividade moderada	2
I ₃	Zonas com declividade elevada	3
I ₄	Demais áreas	4
Variável: K – rede cárstica		
K ₁	Rede cárstica bem desenvolvida	1
K ₂	Áreas cárstica pouco desenvolvida	2
K ₃	Demais áreas	3

Considerando os valores relativos e os fatores de ponderação, tem-se o índice de vulnerabilidade com variação entre 9 (mais vulnerável) à 34 (menos vulnerável). Os autores deste método recomendam empregar a seguinte classificação:

- Vulnerabilidade alta (9-19)
- Vulnerabilidade moderada (20-25)
- Vulnerabilidade baixa (26-34)

RESULTADO

O aquífero cárstico na bacia hidrográfica do rio Salitre apresentou vulnerabilidade extrema à alta no método GOD (Figura 5), e alta vulnerabilidade no método EPIK (Figura 6), como apresentado na Figura 5. As áreas de baixa vulnerabilidade correspondem a regiões com sedimentos não consolidados, que correspondem a áreas cársticas cobertas.

Estas regiões apresentam algumas características do relevo epicárstico (sumidouros, depressões, cavidades...), apresentando alta vulnerabilidade no método EPIK.

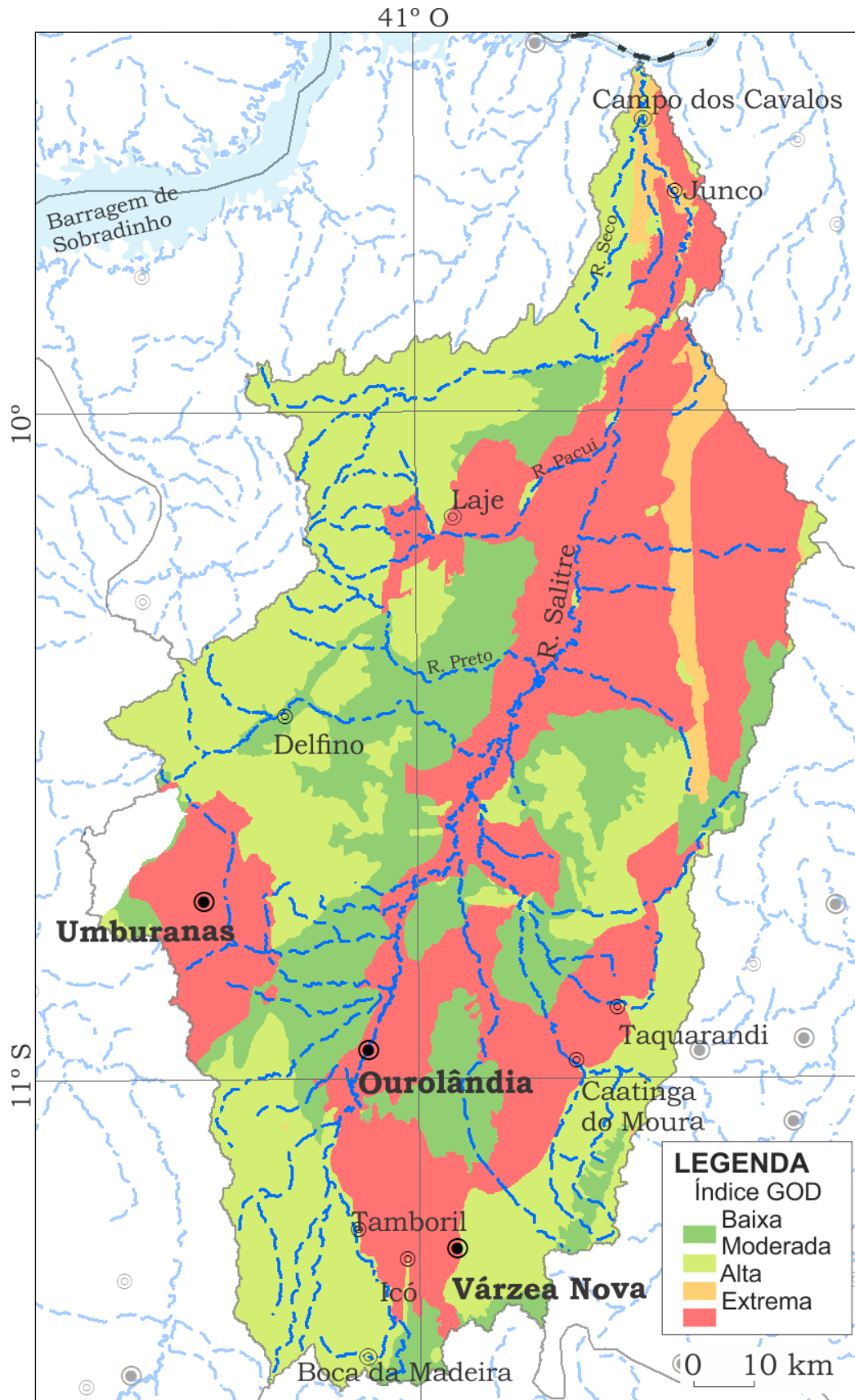


Figura 5. Mapa de vulnerabilidade, método GOD.

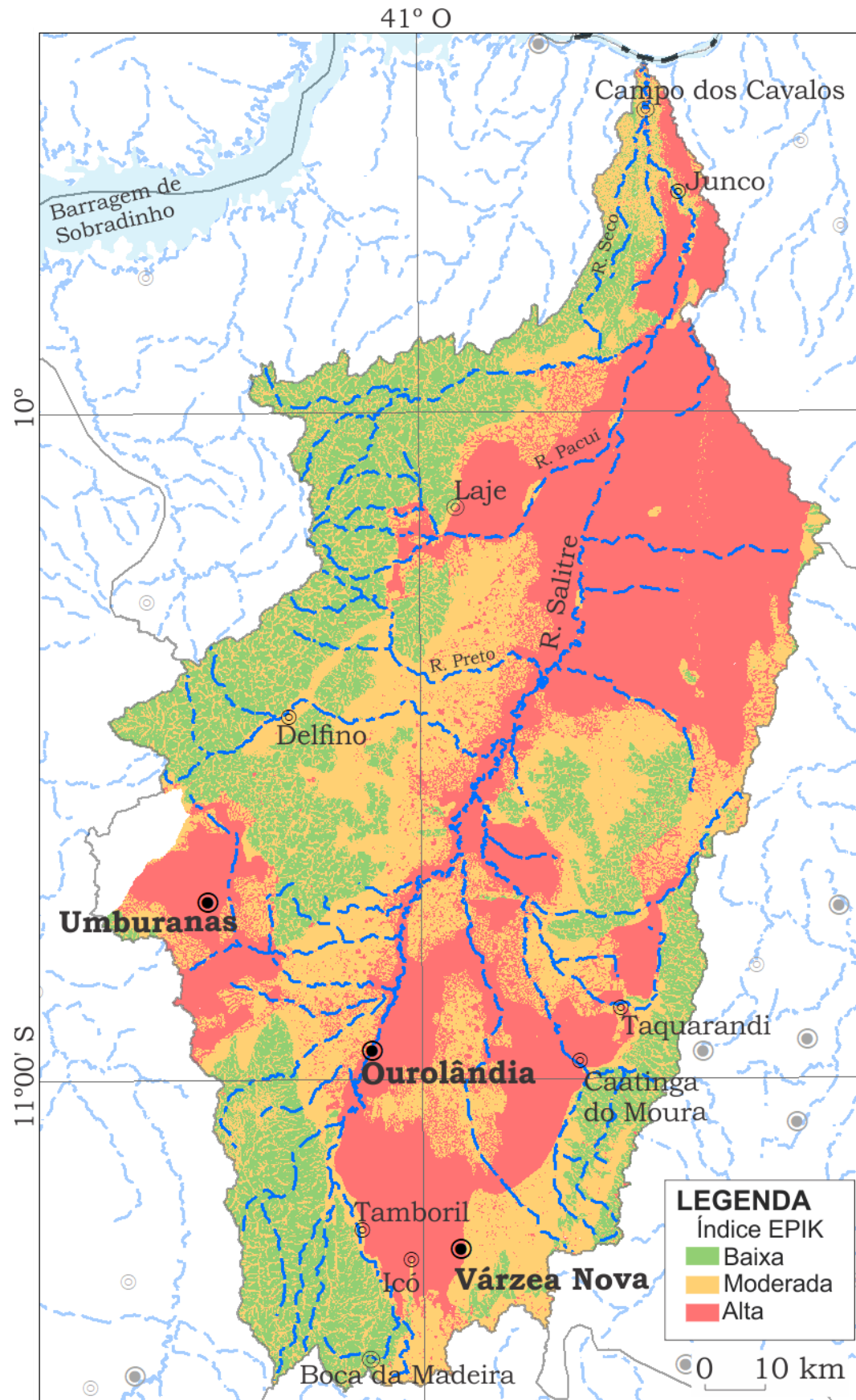


Figura 6. Mapa de vulnerabilidade, método EPIK.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

No tocante ao uso de diversos dados, a escala e a delimitação das unidades fisiográficas tem se mostrado um problema fundamental para a aplicação dos métodos, devido a sua concepção e classificação se apresentarem de formas distintas para diferentes autores, evidenciando essencialmente o problema, o nível de detalhe e a data de aquisição da informação.

Os estudos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos é um instrumento importante para a proteção dos recursos hídricos subterrâneos, sendo analisado a interação do contaminante com a fisiografia do relevo e com os aspectos hidrogeológicos. Estes estudos acontecem há mais de 45 anos e ainda se discute a sua definição e a aplicabilidade dos métodos de avaliação. Isto ocorre em decorrência da maioria dos métodos executarem uma análise qualitativa, tendo como resultado um mapa indicando áreas homogêneas com alta, média ou baixa vulnerabilidade à contaminação; inexistência de um consenso sobre “quais aspectos” são relevantes na avaliação da vulnerabilidade à contaminação.

Na análise de diversos artigos sobre esta temática, constata-se a existência de duas vertentes nos estudos relacionados a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos: (a) Desenvolvimento de novas metodologias baseadas na análise geográfica, nas características ambientais e disponibilidade da informação; (b) Aplicação destes métodos em áreas distintas.

A aplicação dos métodos GOD e EPIK utilizando um Sistema de Informação Geográfica, proporcionou um espaço eficiente na análise das características intrínseca do aquífero.

O método GOD apresenta uma visão geral das áreas da vulnerabilidade a contaminação do aquífero. Por outro lado, as regiões de relevo cársticos possuem características específicas, que podem concentrar rapidamente a água de infiltração para o aquífero cárstico.

Contudo, é importante ressaltar que tais métodos devem ser vistos como instrumento auxiliar na identificação de áreas vulneráveis. Portanto, os estudos de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos podem ser considerados instrumentos de gestão e tomada de decisão, sendo incorporado como ferramenta na proteção dos recursos hídricos subterrâneos, devendo ser utilizados de modo ágil e eficaz.

REFERÊNCIAS

- ALBINET, M. **La pollution des eaux souterraines. Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, DS 63 A 127, oct. 1963. 127 p.
- _____. **Les cartes de vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution. Bureau de recherches géologiques et minières**, Orléans, 70 SGN 325 HYD, aug. 1970. 31 p.
- ALLER, L.; et al. Drastic: a standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings. **Research and Development**, Chicago, EPA/600/2-87/035, june 1987. 58 p.
- AULER, A.S. **Karst evolution and palaeoclimate in Eastern Brazil**. Ph.D. Thesis, University of Bristol, 1999.
- AULER, A.S.; SMART, P. L. Late quaternary paleoclimate in semiarid northeastern Brazil from U-Series dating of travertine and water-table speleothems. **Quaternary Research**, v. 55, p. 159–167, 2001.
- BARBOSA, J. S. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. **Geologia da Bahia: Texto Explicativo para o Mapa Geológico ao Milionésimo**. Sec. Ind. Com. e Min., SGM, Salvador, 1996.

- BASTOS LEAL, L. R.; et al. Hidrogeologia dos aquíferos cársticos do cráton do São Francisco no estado da Bahia: Implicações para a gestão das águas subterrâneas. III SIMP. CRÁTON DO S. FRANCISCO, Exp. Abs., CDROM, 2005.
- BRANNER, J.C. Aggraded limestone plains of the interior of Bahia and the climatic changes suggested by them. **Geological Society of America Bulletin**, v. 22, n. 1, p. 187-206, 1911.
- CIVITA, M.; DE MAIO, M. SINTACS: **Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia delle vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automatizzazione**. Bologna: PitagoraEditrice, 1997.
- DÖRFLIGER, N.; JEANNIN, P. Y.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environmental Geology**, Heidelberg, v. 39, n. 2, p. 165-176, dec. 1999.
- DÖRFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. EPIK a methodology for evaluating vulnerability of groundwater to contamination in karstic aquifer; its application on a test site in Swiss Jura. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM AND FIELD SEMINARION: KARST WATERS & ENVIRONMENTAL IMPACTS, sept., 1995, Antalya. Abstract... Antalya: UKAM, 1995. p. 81-82.
- EUROPEAN COOPERATIONS IN THE FIELD OF SCIENTIFIC AND TECHNICAL RESEARCH (COST EU). Cost 620: vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Luxembourg: European commission, 2001.
- FOSTER, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: DUIJVENBOODEN, W.; WAEGENINGH, H. G. (Eds.). Vulnerability of soil and groundwater to pollutants: proceedings and information n° 38 of the International Conference held in the Netherlands. Amsterdam: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69-86.
- FOSTER, S.; et al. Groundwater quality protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environmental agencies. Washington: World Bank Group, 2002.

- INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS (INEMA). **Regiões de Planejamento e Gestão das Águas**. Salvador: INEMA, 2014. Disponível em: <<http://www.inema.ba.gov.br/gestao-2/rpgas/>> Acesso em 14 set. 2015.
- LEGRAND, H. E. System for evaluation of contamination potential of some waste disposal sites. *Journal American Water Works Association*, Denver, v. 56, n. 8, p. 959-974, aug. 1964.
- MANOEL FILHO, J. Contaminação das águas subterrâneas. In: FEITOSA, F. A. C.; et al. (Org. e Coord.) *Hidrologia: conceitos e aplicações*. 3ª ed. Rio de Janeiro: CPRM, 2008. Cap. 5.3, p. 381-404.
- MARGAT, J.; ALBINET, M. La pollution des eaux souterraines par les eaux de surface. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, DS 65 A 96, nov. 1965. 21 p.
- MARGAT, J.; MONITION, L.; RICOUR, J. Eaux souterraines et pollutions radio-actives. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, DS 67 A 132, oct. 1967. 7 p.
- _____. Emploi des eaux souterraines en cas de protection radioactive superficielle. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 68 SGL 153 HYD, oct. 1968. 13 p.
- MARGAT, J. **Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution: bases de la cartographie**. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 68 SGL 198 HYD, nov. 1968. 12 p.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty**. Washington: NRC, 1993.
- PENHA, A.E.P.P. **O calcário Caatinga de Ouralândia, Bahia: feições diagnósticas, gênese e evolução de um perfil calcrete**. Dissertação de Mestrado, Univ. Federal da Bahia, Salvador, 1994.
- SILVA, A. B. **Recursos hídricos subterrâneos da bacia do rio Salitre, Bahia: uso sustentável na indústria do mármore Bege Bahia**. Salvador: CBPM, 2006 (Série Arquivos Abertos, nº 24.)
- SUGUIO, K.; BARCELOS, J.H.; MATSUI, E. Significados paleoclimáticos e paleoambientais das rochas calcárias da Formação Caatinga (BA) e do Grupo Bauru

(MG/SP). In: XXXI CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, out., 1980, Camboriú. **Anais...** Camboriú: SBG, 1980, v.1, p. 607-617.

VRBA, J.; ZAPOREZEC, A. (Ed.). **Guidebook on mapping groundwater vulnerability**. Hannover: Heinz HeiseVerlag, 1994.

VRANA, M. Map of groundwater protection in Bohemia and Moravia. Praha: Wat. Res. Plan Cent., 1968.

VUILLAUME, Y. Les conditions de l'épuration naturelle des eaux souterraines para les roches aquifers filtrantes (pollution para les microorganisms). Bureau de recherches geologiques et minieres, Orléans, DS 66 A 67, jun. 1966. 50 p.

WALKER, W. H. Illionois ground water pollution. Journal American Water Works Association. Washington: AWWA, v. 61, n.1, p. 31-40, jan. 1969.

CAPÍTULO III

**ARTIGO II – PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO
DA VULNERABILIDADE A CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS
CÁRSTICOS: ESTUDO DE CASO A REGIÃO CÁRSTICA DO
RIO VERDE E JACARÉ, BA, BRASIL**

RESUMO

Numa perspectiva mais ampla, as estratégias de proteção da água subterrânea devem ser promovidas pelo órgão de regulamentação ambiental ou de recursos hídricos, sendo importante, prestar atenção à dimensão e ao nível de detalhe da avaliação e da proteção de fontes específicas sobre abastecimento de água. Neste sentido, a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos à contaminação representa uma importante ferramenta para gestão dos recursos hídricos subterrâneos, pois permite identificar quais as áreas mais vulneráveis a contaminação na área em estudo. O presente artigo apresenta um novo método de avaliação, baseado na metodologia aplicada no método GOD e EPIK, e da potencialidade das ferramentas de análise morfométrica e processamento digital de imagens inseridas no Sistema de Informação Geográfica. Para tanto, foi escolhido como área de estudo as bacias hidrográficas do rio Jacaré e Verde. O resultado apresentou áreas com extrema vulnerabilidade, principalmente nas regiões com predomínio de feições cársticas, localizadas nas proximidades de rios. As áreas com baixa vulnerabilidade ou desprezível, encontra-se localizadas nas regiões mais elevadas das bacias.

Palavras-chave: Vulnerabilidade a contaminação de aquíferos, aquífero cárstico, índice de vegetação, índice de posição topográfico.

ABSTRACT

In a broader perspective, groundwater protection strategies should be promoted by the environmental or water resource agency, and it is important to pay attention to the size and detail of the assessment and protection of specific sources of water supply. In this sense, the assessment of the vulnerability of aquifers to contamination represents an important tool for the management of groundwater resources, since it allows identifying which areas are most vulnerable to contamination in the area under study. The present article presents a new evaluation method, based on the methodology applied in the GOD and EPIK method, and the potential of the tools of morphometric analysis and digital image processing inserted in the Geographic Information System. Therefore, the hydrographic basins of the Jacaré and Verde river were chosen as the study area. The result presented areas with extreme vulnerability, mainly in regions with predominance of karstic features, located near rivers. Areas with low or negligible vulnerability are located in the highest regions of the basins. With this data it is possible to establish before the construction of tubular wells, the quality of this water through the data of vulnerability to contamination in these Hydrographic Basins.

Keywords: Vulnerability Assessment to contamination of aquifers, karst groundwater, Vegetation index, topographic position index.

INTRODUÇÃO

Na gestão das águas subterrâneas, vem sendo difundido o uso de ferramentas e metodologias destinadas à proteger a sua qualidade natural, por ser uma importante fonte de água para consumo humano. Todavia, com a expansão urbana e industrial, o risco de contaminação destas águas vem aumentando consideravelmente.

Duas abordagens vêm sendo empregados na avaliação das condições hidrogeológicas, saber: o perigo de contaminação e a vulnerabilidade à contaminação. O primeiro reporta a probabilidade de que o aquífero seja impactado por conta das ações antrópicas, analisando a interação do contaminante com o ambiente (FOSTER; et al, 2002); e o segundo busca analisar a vulnerabilidade do ambiente à contaminação, por meio de procedimentos metodológicos e teóricos que possibilitam modelar a fisiografia do relevo (geologia, hidrogeologia, pedologia...) a fim de identificar a suscetibilidade do ambiente perante à intervenção antrópica. Esta última vertente possui um caráter preventivo, determinando sua capacidade de proteção natural.

Nesta perspectiva, há duas linhas de pesquisa sobre vulnerabilidade à contaminação de aquíferos, intrínseca ou específica (DE MAIO, 1997; DALY et al., 2002; CIVITA; VRBA; ZAPOROZEC, 1994). A primeira expressa a vulnerabilidade do sistema aquífero por meio da caracterização da fisiografia do relevo, determinando o grau de susceptibilidade natural à contaminação; enquanto que a segunda analisa o impacto de um contaminante no ambiente, analisando os processos de absorção-adsorção, dissolução, precipitação e atenuação natural.

Existem alguns métodos clássicos como GOD (FOSTER, 1987), DRASTIC (ALLER, et al. 1985) e EPIK (DÖRFLIGER; ZWAHLEN, 1996), que de modo geral, são baseados na reinterpretação das informações temáticas disponíveis (mapas geológicos, geomorfológicos, pedológicos) e inferência geográfica, tendo como resultado a confecção de um único produto cartográfico, construído a partir de uma escala, ou índice, que expressa o grau de vulnerabilidade.

Estes métodos foram desenvolvidos de acordo com a disponibilidade das informações e para determinada área. Com os avanços técnico científicos, principalmente na coleta e no tratamento das informações geográficas, outros autores buscaram adequar estes métodos a sua realidade, principalmente na avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos cársticos, como o método COP (VÍAS; et al., 2006), COP-K (ANDREO; RAVBAR; VÍAS, 2009), DSWAP (BLODGETT, 1993), PaPRIKa (DÖRFLIGER; PLAGNES; KAVOURI, 2009), PI (GOLDSCHIEDER et al., 2000), RESK (MALIK; SVASTA, 1999), RISK (DÖRFLIGER; 2005), RISKE (PETELET-GIRAUD; DÖRFLIGER; CROCHET, 2001), RISKE 2 (PLAGNES; et al., 2008), VUKA (LEYLAND; WITTHÜSER, 2010).

Em síntese, estes métodos utilizam as seguintes informações geográficas: pedologia, precipitação, condições de infiltração, geologia, áreas de recarga e características do meio cárstico.

A presente pesquisa tem como objetivo avaliar a vulnerabilidade à contaminação do aquífero cárstico da região de Irecê - BA, aplicando um método desenvolvido com base GOD e EPIK.

Existem vários métodos desenvolvidos para avaliar a vulnerabilidade de sistema aquíferos, podendo ser dividido em 3 categorias principais: métodos baseados em processos de simulação; método estatístico e métodos de índices. Os dois primeiros requerem grandes quantidades de dados para uma adequada análise matemática e estatística. O método de índice combina vários atributos físicos, cada qual com um determinado peso na vulnerabilidade do aquífero de acordo com a disponibilidade de dados técnicos e/ou recursos humanos suficientes para alcançar esse ideal.

Os resultados deste trabalho podem ser utilizados na gestão da água, identificando as áreas com maior susceptibilidade ambiental, instruindo os gestores para a tomada de decisão, por meio de medidas preventivas à poluição ou instalação de rede de monitoramento.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a região de domínio cárstico localizada na microrregião de Irecê, Estado da Bahia. De acordo com o IBGE, estes domínios morfoestruturais denominados de Baixadas do rio Jacaré, Chapada do Irecê e Patamar de Souto Soares, como apresentado na Figura 01.

A área apresenta o clima do tipo seco à sub úmido e está contida regionalmente na bacia hidrográfica do rio São Francisco, apresentando maior pluviosidade no mês de

dezembro e menor pluviosidade no mês de agosto, com base na média mensal de precipitação, no período de 1993 a 2015, da Estação Climatológica convencional do INMET (INMET, 2016a), localizada no município de Irecê - BA, vide Figura 2.



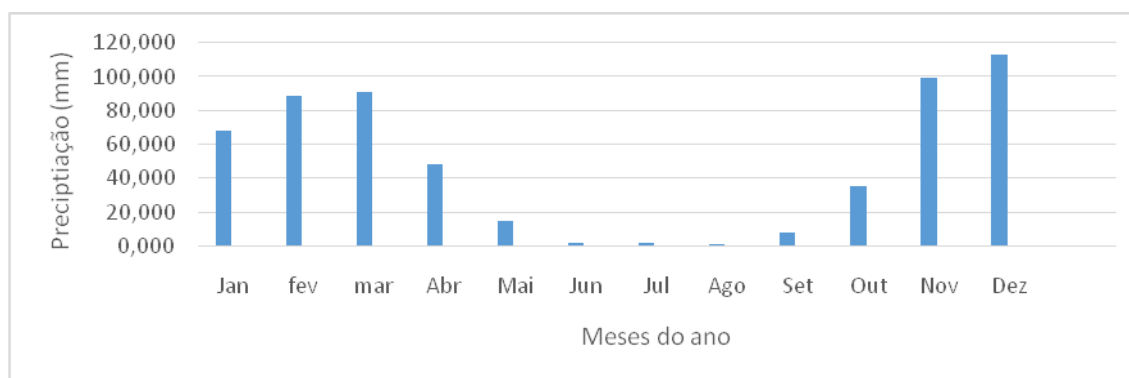
Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

Regionalmente, a área está inserida no panorama geológico da região central do Estado da Bahia, tendo como modelo evolutivo um padrão estrutural do tipo aulacogênico (SOUZA et al. 1993), que corresponde a um grande sinclinal de eixo aproximadamente N-S, cujo a nucleação sucedeu-se durante o primeiro evento do Ciclo

Brasilião. O sistema de dobramentos superposto a essa estrutura apresenta vergência tectônica para sul, relaciona-se a uma fase de deformação progressiva. (LAGOEIRO, 1990; DANDERFER FILHO 1990).

Nesta região, afloram unidades litoestratigráficas mesoproterozóicas, predominantemente de natureza siliciclástica representadas da base para o topo pelas Formações Tombador, Caboclo e Morro do Chapéu compondo o Grupo Chapada Diamantina e uma espessa sequência carbonático-pelítica, neoproterozóica que compõe o Grupo Una (Supergrupo São Francisco). Finalmente, recobrando as rochas Pré-cambrianas, afloram coberturas detríticostécio-quaternárias (Misi 1979, Souza et al. 1993, Souza et al. 2002).

Figura 2. Média mensal da precipitação no período de 1993 a 2015.



Fonte: INMET, 2016a.

A sequência carbonático-pelítica do Grupo Una repousa discordantemente sobre os metassedimentos do Grupo Chapada Diamantina e é formada da base para o topo pelas Formações Bebedouro e Salitre. A Formação Bebedouro é constituída predominantemente por metassiltitos, metargilitos e metadiamicritos. Já a Formação Salitre, hospedeira do aquífero cárstico, é constituída predominantemente por

calcissiltitos, dolomitos e lamitos algais fracamente ondulados na base, gradando para calcilutitos, calcarenitos, dolarenitos e dololutitos oolíticos no topo (Souza et al. 1993).

Associado às rochas carbonáticas, são reconhecidos dois domínios estruturais, vinculados a duas fases de deformação compressivas brasileiras. O primeiro domínio envolve a porção sul do aquífero (região de Iraquara) e os contatos leste e oeste com as rochas do Grupo Chapada Diamantina, onde as rochas carbonáticas apresentam estratificação plano-paralela ondulada, amplos dobramentos com eixo N-S e lineamentos estruturais associados a falhas de empurrão de direção N-S (Figura 1). Neste contexto desenvolveu-se um sistema cársticos cuja morfologia é caracterizada por elevada densidade de dolinas, normalmente com formatos arredondado e grande diâmetro (até 200 m), maior espessura de solos e vales profundos. Já o segundo domínio estrutural, representado principalmente na porção central do aquífero (região de Irecê), é caracterizado pela presença de intensos cavalgamentos, com dobramentos e falhamentos de baixo ângulo associados e vergência para SSE. Neste cenário, têm-se um sistema aquífero de natureza cárstico-fissural, pouco evoluído, dolinas com forma elíptica, pequeno diâmetro (entre 5 – 15 m) e alinhadas segundo os “trends” dos lineamentos estruturais E-W, além da presença de sumidouros e solos muito rasos (Guerra 1986, Bastos Leal et al. 2004; Ramos 2005).

Cadastramento realizado no ano de 2004, revelou a existência de cerca de 6.000 poços tubulares perfurados neste aquífero cárstico, e um incremento anual de cerca de 250 novos poços (Bastos Leal et al. 2004). Tratamento estatístico dos dados destes poços revelaram que mais de 50% apresentam vazões menores que 7 m³/h e que

apenas 8% dos poços possui vazões superiores a 25 m³/h (Luz et al. 2004). Estes poços com maiores vazões estão em geral perfurados próximos aos grandes lineamentos estruturais regionais e às zonas de descarga do aquífero e nas áreas próximas dos contatos com metassedimentos da Chapada Diamantina nas bordas leste e oeste do aquífero.

De forma geral, o aquífero apresenta nível freático próximo à superfície, com valores menores que 15 m, observados em mais de 50% dos poços, enquanto níveis freáticos mais profundos (> 45 m) são observados nas porções sul e sudeste (ex: região de Iraquara) (Luz et al. 2004, Silva 2005). Devido ao grande aumento de poços perfurados na região central da região, especialmente para atender às demandas das atividades agrícolas, têm-se observado rebaixamento do nível freático do aquíferos em cerca de 1,0m por ano ao longo dos últimos 20 anos (Silva 2005, Ramos 2005).

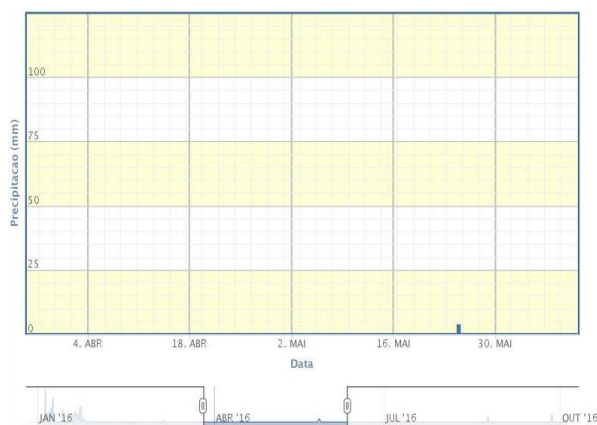
O MÉTODO

O método proposto foi baseado na combinação dos conceitos aplicados nos métodos GOD (FOSTER, 1987) e EPIK (DÖRFLIGER; ZWAHLEN, 1997), da potencialidade das ferramentas de análise morfométrica e processamento digital de imagens inseridas no Sistema de Informação Geográfica (SIG). Para a realização do processamento digital das imagens foi utilizada o software ENVI 5.3 (HARRIS, 2015); e para os procedimentos de análise espacial, utilizou o software o ARCGIS 10.4 (ESRI, 2016).

Para as informações sobre a forma do relevo, utilizou as imagens da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução de 1 arco segundo (ou 1" ou 0,00027778°) corrigida cartograficamente (SRTM – MDT, versão 4), no sistema de coordenadas UTM, datum WGS84 (JARVIS et al. 2004), e disponibilizadas pela Consultative Group for International Agricultural Research - Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI, 2004).

As imagens utilizadas neste trabalho foram do satélite Landsat 8 (Landsat Data Continuity Mission – LCDM) obtidas da base de dados da USGS (2015), com a projeção UTM, datum WGS 1984; e a localização das imagens no World wide Reference System (WRS, versão 2), correspondem as órbitas de 217 (pontos 68) e 218 (pontos 67 e 68), capturadas no dia 27 de abril e 07 de junho de 2016, respectivamente. Estas imagens foram selecionadas pela ausência de nuvem e analisando as informações de precipitação na região, nota-se que os dias que antecedem a captura da imagem não há registro de precipitação descrito anteriormente (Figura 3).

Figura 3. Quantidade de precipitação diária de 01 abril a 15 de junho de 2016.



Fonte: INMET (2016b).

Como as imagens de sensoriamento remoto são uma representação digital dos valores da radiância, assim, para obter uma imagem de reflectância, deve-se converter os valores digitais para radiância e depois em reflectância.

Para a conversão da imagem em valores de reflectância e a correção atmosférica dos dados foi utilizado o aplicativo Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH), baseado no modelo Moderate Resolution Atmospheric Transmission - MODTRAN-4 (ADLER-GOLDEN et al., 1999). Este processamento foi realizado com o intuito de diminuir os efeitos de absorção e espalhamento da radiação de energia eletromagnética devido a interação desta com partículas e gases da atmosfera e a obtenção da imagem de reflectância de superfície.

Para a transformação dos valores de nível de cinza para radiância no topo da atmosfera, foi utilizado o coeficiente radiométrico descrito no arquivo de metadados da imagem, utilizando a seguinte equação:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L$$

Onde: L_{λ} corresponde ao valor de radiância espectral no topo da atmosfera (medidos em valores de Watts/m²s*rad* μ m); M_L e A_L são os fatores multiplicativo e aditivos de reescalonamento de cada banda; Q_{cal} refere-se ao valor de nível de cinza do pixel.

O método GOD, desenvolvido por Foster (1987), estabelece a vulnerabilidade intrínseca do aquífero, com base na inacessibilidade hidráulica da zona saturada e da capacidade de atenuação da paisagem localizados acima do aquífero. Para tanto, este

método se baseia na análise das três variáveis que a compõem: o confinamento hidráulico (Ground water occurrence), características do estrato de cobertura (Overall aquifer class) e profundidade do aquífero (Depth to groundwater).

O método EPIK foi desenvolvido por Dörfliger e Zwahlen (1997), especificamente para ser empregado em regiões cársticas, executando uma análise ponderada de 4 variáveis que caracterizam o grau de proteção num aquífero cárstico, sendo eles: Epicárstico (Epikarst), cobertura de proteção (Protective cover), condições de infiltração (Infiltration conditions) e desenvolvimento da área cárstica (Karst network development).

GEOLOGIA

A contribuição da Geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica da paisagem natural compreende as especificações dos estratos de cobertura da zona saturada do aquíferos em termos de: (a) grau de consolidação (e, portanto, provável presença, ou ausência, de permeabilidade por fissuras); e (b) tipo de litologia (e, portanto, porosidade indiretamente dinâmico-efetiva, permeabilidade da matriz e teor de umidade da zona não saturada ou retenção específica). Sua pontuação segue as recomendadas por Foster (1987), adotados no método GOD.

ACUMULAÇÃO DE ÁGUA

A acumulação de água está relacionada ao processo de escoamento da rede hídrica, tanto superior, como subterrânea. Nas regiões cársticas está condicionado diretamente a forma do relevo, como dolinas, poljes, maciços rochosos, lapiás, úvulas, vales cegos e recuados. No contexto da morfogênese, estas formas são típicas dos

processos de dissolução e o transporte em solução; e no ponto de vista morfodinâmico, são consideradas unidades elementares, comparáveis a simples bacias que, com seus sistemas de vertentes, convergem inicialmente águas superficiais para pontos de absorção localizados no fundo das depressões (PILÓ, 2002). Assim, estes locais são considerados de acumulação e/ou retenção da água, expressando o grau de desenvolvimento e as condições do aquífero.

Para extrair estas informações foi utilizado o Índice de posição topográfica – IPT (MOORE; et al., 1991), que caracteriza a topografia com base nos padrões morfológicos (VERSTAPPEN, 1977; VERSTAPPEN, 1983; VAN ZUIDAM; VAN ZUIDAM-CANCELADO, 1979; VERSTAPPEN; VAN ZUIDAM, 1991). Neste caso, este índice realça as feições epicársticas, como apresentado na Figura 3. Sua pontuação segue as recomendadas por Döfliger e Zwahlen (1997), para cobertura de proteção.

Figura 3. Índice de posição topográfico.



COBERTURA DE PROTEÇÃO

A cobertura de proteção corresponde ao solo, pois é um atributo da paisagem que possui maior incidência na capacidade de proteção dos aquíferos frente a contaminação. Os processos físicos, químicos e biológicos, que tem lugar na camada edáfica, minimizam o impacto dos potenciais contaminantes. Se estimam indiretamente a partir da textura, estrutura, espessura do solo. Sua pontuação segue as recomendadas por Dörfliger e Zwahlen (1997), para cobertura de proteção.

INFORMAÇÃO SOBRE USO DO SOLO E PRECIPITAÇÃO

As informações advindas do uso e cobertura do solo se revestem da maior importância, pois representa a defesa da paisagem contra os efeitos dos processos modificadores das formas de relevo. As atividades antrópicas são fatores que influenciam a qualidade da água nos aquíferos. No entanto, os tipos de uso da terra podem refletir a complexidade e a densidade das atividades humanas, e o sistema de águas subterrâneas tem uma forte resposta aos tipos superiores de uso da terra.

Dentre as variáveis utilizadas para avaliação da mudança do uso do solo recomenda-se o uso do índice de vegetação, pois possibilita a caracterização e quantificação de parâmetros biofísicos de florestas, culturas agrônômicas e mudanças provocadas no uso do solo (TUCKER, 1985). Além disto, as variações climáticas, principalmente de precipitação e temperatura, influenciam na fenologia da vegetação com períodos de maior vigor vegetativo nos períodos chuvoso, e menor no período de estiagem (SANTOS; NEGRI, 1997).

Dessa forma, as variações na determinação de áreas com cobertura vegetal podem estar associadas à dinâmica climática, especificamente em relação aos índices pluviométricos do ano de aquisição e antecedente à tomada das imagens (HUXMAN et al., 2004). Assim, Chavez (2012), Guimarães (2009) e Oliveria; Chavez; Lima (2009), recomendam que a aquisição da imagem seja realizada no período de estiagem.

O índice de vegetação realçado foi o EVI (do inglês, Enhanced Vegetation Index), formulado a partir da combinação do índice de vegetação ajustado ao solo (HUETE, 1988) e o índice de vegetação resistente à atmosfera (KAUFMAN; TANRÉ, 1992), como demonstrado na seguinte equação:

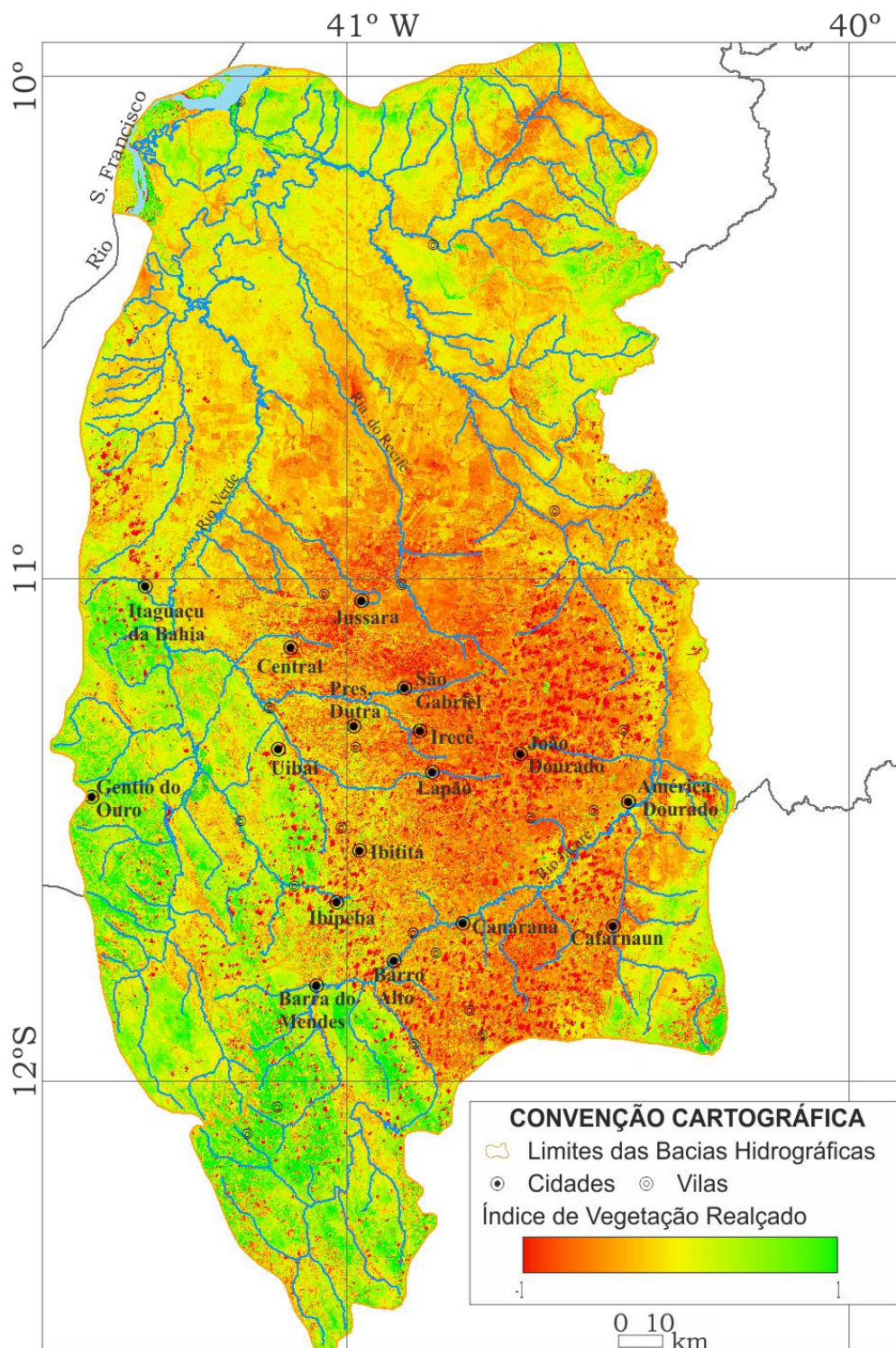
$$EVI = \frac{G(IVP - V)}{(IVP + C_1 * V - C_2 * A + L)}$$

Onde: *IVP* corresponde ao valor de reflectância do comprimento de onda na faixa do infravermelho próximo, tendo como característica baixa absorção de energia solar pelos pigmentos fotossintetizantes (clorofila), ocasionando alta reflectância; *V* reporta ao valor de reflectância do comprimento de onda na faixa do vermelho, com tais característica opostas ao *IVP*; *A* corresponde a reflectância na banda do azul; *C₁* ao coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do vermelho; *C₂* ao coeficiente de correção dos efeitos atmosféricos para a banda do azul; *L* ao fator de correção para a interferência do solo (1); e *G* ao fator de ganho. De acordo com Huete et al. (1997), os valores de *C₁*: 6, *C₂*: 7.5, *L*: 1 e *G*: 2.5 são constantes e foram obtidas empiricamente.

O EVI é um modelo resultante da combinação dos níveis de reflectância em imagens de satélites, que provem da equação composta pelas respostas das bandas espectrais do azul, vermelho e infravermelho próximo. O EVI é recomendado em estudos de avaliação da mudança do uso do solo, pois além do diagnóstico detalhado da fitomassa fotossinteticamente ativa, corrige os efeitos de sombras oriundas da elevação topográfica sobre a imagem (HOLBEN et al., 2007; TUCKER, 1985).

Por outro lado, nas regiões próxima a encostas, há um elevado vigor vegetativo, ocasionando aumento da precipitação, deslocamento do ar pela fricção superficial (incorrendo na formação de nuvens, portanto, precipitação de chuvas rápidas e garoa). Estes fatos somados às características do solo, como a umidade e a cobertura vegetal, colaboram para o desenvolvimento da vegetação e conseqüentemente, exploração da agricultura (Figura 4).

Figura 4: Índice de Vegetação EVI.



O índice final integral de vulnerabilidade do aquífero é o produto da somatória dos três índices.

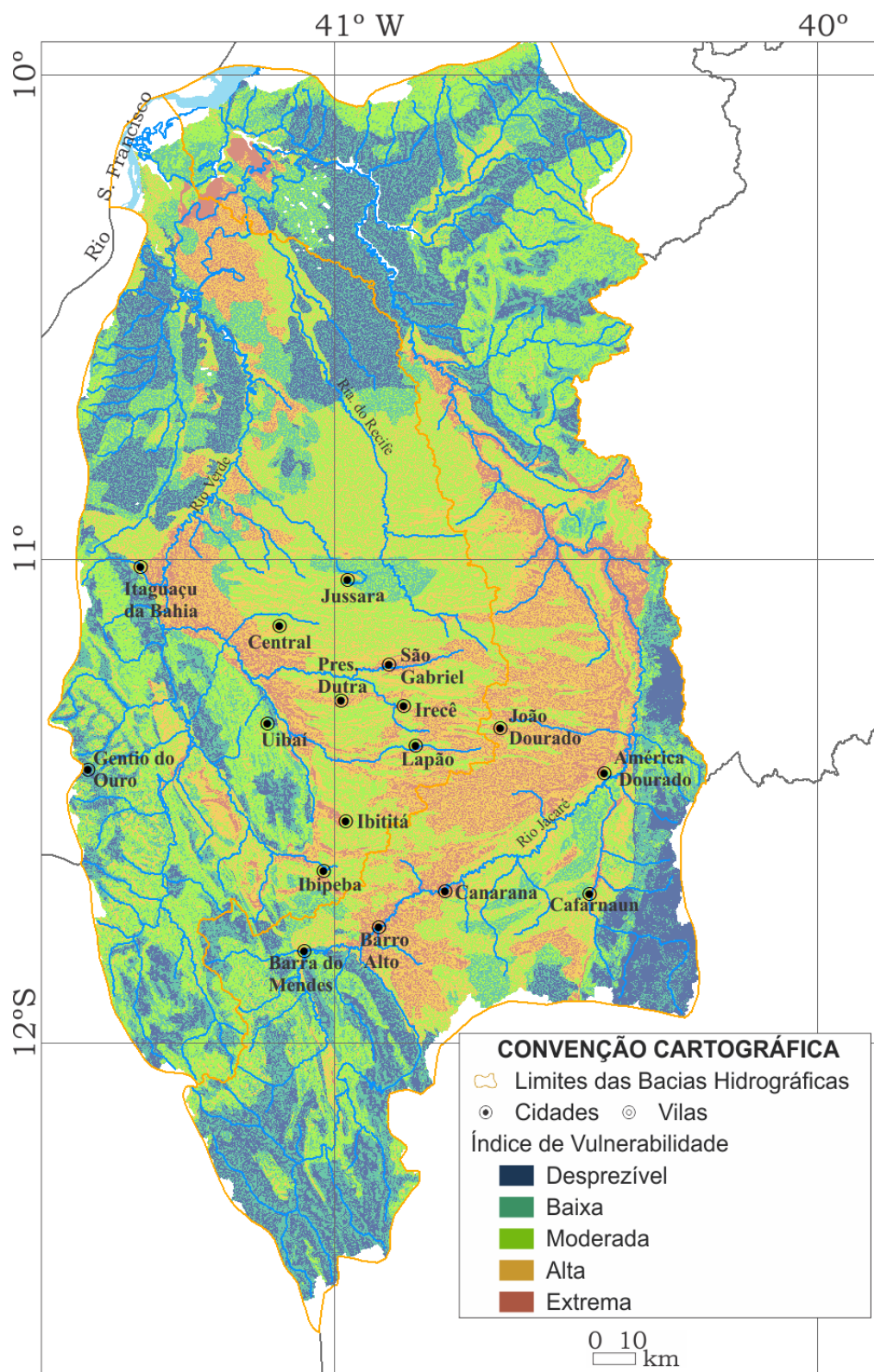
RESULTADO

Como observado na Figura 6, a vulnerabilidade do aquífero à contaminação na Bacia Hidrográfica do rio Jacaré e Verde variaram de Desprezível a Extrema. O índice mostrou-se com alta e extrema vulnerabilidade nas regiões próximas ao rio Jacaré e Verde, de litologia Calcarenito e aquífero cárstico.

A vulnerabilidade desprezível está distribuída nas áreas com litologia arenito e detrito-laterítico, e com elevado vigor vegetativo. Esta vulnerabilidade indica uma probabilidade remoto de qualquer contaminante atingir a zona saturada do aquífero, visto que o fluxo vertical, está protegido. A área envolvida por esta vulnerabilidade está coerente com o modo de uso do solo.

A vulnerabilidade moderada corresponde as áreas aplainadas, indicando que nestes locais somente alguns contaminantes podem alcançar a zona saturada do aquífero quando lançados continuamente.

Figura 6: Índice de vulnerabilidade.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração do mapa da vulnerabilidade à contaminação do aquífero cárstico através do método proposto contribuiu para a espacialização desta nas Bacia Hidrográficas do rio Jacaré e Verde, Bahia. Por sua vez representa uma importante ferramenta para gestão das águas subterrâneas, colaborando para manutenção e reconhecimento da qualidade das águas subterrâneas e para o manejo e gestão ambiental, visando à manutenção dos recursos hídricos subterrâneos em excelente estado para atuais e futuras gerações.

Com esse trabalho foi possível apresentar quais as regiões são mais vulneráveis a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, tão utilizados atualmente pelas comunidades. Com esses dados pode-se prever antes da perfuração de poços tubulares, locais onde provavelmente a água subterrânea poderá estar contaminada.

Após a conclusão deste trabalho, vale ainda salientar a importância das imagens de sensoriamento remoto e das ferramentas inseridas no Sistema de Informação Geográfica, uma vez que a partir das informações prestadas nesse cadastramento, podem ser desenvolvidos estudos com a finalidade de melhor gerenciamento e conservação das águas subterrâneas.

REFERÊNCIA

- BASTOS, L.R.; et al. Caracterização hidrogeológica do aquífero cárstico de Irecê. In: BASTOS LEAL; PEIXOTO (eds.). Modelagem hidrológica do sistema aquífero-rio nas bacias hidrográficas dos rios Verde e Jacaré: Instrumentos para a gestão dos recursos hídricos, 435p, 2004.
- BOMFIM, L.P.C.; et al. Projeto bacia de Irecê: Relatório final. Salvador: CPRM. Convênio CPRM-SME, 1985.
- BRITO NEVES, B.B. Água subterrânea na região central da Bahia, condicionamento e demanda. Recife, CONESP, Relatório No 21, 32 p. 1967.
- CARTER, J.M.; DRISCOLL; D.G. Estimating recharge using relations between precipitation and yield in a mountainous area with large variability in precipitation. J. Hydrol., 316:71-83. 2006.
- CHAVES, I. B.; et al. Índices espectrais e diagnóstico da degradação da caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, Paraíba-BR. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA, XIC, 2012, Lajes. **Anais...Lajes: SBCS**, 2012. CD Rom.
- CONSULTATIVE GROUP FOR INTERNATIONAL AGRICULTURAL RESEARCH – CONSORTIUM FOR SPATIAL INFORMATION (CGIAR – CSI). **SRTM 90 m Digital Elevation Data**. Washington, 2005. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org/>>. Acesso em: 28 dez. 2015.
- DALY, D.; DASSARGUES, A.; DREW, D.; DUNNE, S.; GOLDSCHIEDER, N.; NEALE, S.; POPESCU, C.; ZWHALEN, F. Main concepts of the “European Approach” for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal. V. 10, n. 2, pp 340–345, 2002.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). ArcGIS for Desktop, versão. 10.4. Redlands: ESRI, 2016.

- GUERRA, A.M. Processos de carstificação e hidrogeologia do grupo bambuí na região de Irecê – Bahia. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo – USP/SP, 1986.
- GUIMARÃES, A. P. Dinâmica da resposta espectral da vegetação de caatinga na bacia hidrográfica do açude Soledade, utilizando técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias). Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2009.
- HARRIS GEOSPATIAL SOLUTIONS. ENVI: Environment for Visualizing Images, versão 5.3. Builder: Harris, 2015.
- HOLBEN, B. H.; TUCKER, C. J.; FAN, C. Spectral assessment of soybean leaf area and leaf biomass. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Bethesda, v. 46, n. 5, p. 651-656, may, 1980.
- HUETE, A. R. Adjusting vegetation indices for soil influences. *International Agrophysics*, v. 4, n. 4, pp.367-376, 1988.
- HUXMAN, T. E.; et al. Convergence across biomes to a common rain use efficiency. *Nature*, v. 429, n. 6992, p. 651-654, 2004.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Total da precipitação mensal da estação climatológica convencional de Irecê. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima.php#>>. Acesso em: 10 jan. de 2016a.
- _____. Gráfico da precipitação diária da estação climatológica automática de Irecê. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/html/clima.php#>>. Acesso em: 10 jan. de 2016b.
- JARVIS, A.; et al. Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data. Cali: CIAT, 2004.
- KAUFMAN, Y. J.; TANRÉ, D. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v.30, n.2, p. 261-270, mar., 1992.

- LEANEY F.W.; HERCZEG A.L. Regional recharge to a karst aquifer estimated from chemical and isotopic composition of diffuse and localised recharge, South Australia. *J. Hydrol.*, 164:363-387. 1995.
- LUZ, J.A.; BASTOS LEAL, L.R.; BARRETO, F.S. Tratamento estatístico dos dados dos poços da região do Platô de Irecê-Bahia. In: ABAS, XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá, Mato Grosso, P. 45, e CD. 2004.
- MOORE, I.D. et al. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorfological and biological applications. **Hydrological Processes**, v.5, p.3-30, 1991.
- OLIVEIRA, W. M.; CHAVES, I. B.; LIMA, E. R. V. Índices espectrais de vegetação de caatinga em um neossololítico do semiárido paraibano. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO,14, 2009, Natal. Anais... Natal: INPE, 2009. p.2103-2110.
- PANAGOPOULOS, G.; LAMBRAKIS, N. The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *J. Hydrol.*, 25:25-34. 2006.
- PEDREIRA; A.J. Estratigrafia, sedimentologia e recursos minerais da Formação Salitre na Bacia de Irecê, Bahia. Série Arquivos Abertos, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, no 2, 36p, 1993.
- PILÓ, L. B. Revisão de literatura: geomorfologia cárstica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 1, n. 1, pg. 88 – 102, 2000.
- SANTOS, P.; NEGRI, A. J. A comparasion of the normalized difference vegetation index and rainfall for the Amazon and northeastern Brazil. *Journal of applied meteorology*, Washington, v. 36, nº 7, 1997, p. 958-965.
- SILVA, A.B. Contribuição a hidrogeologia dos karsts da região da Bahia. *Revista água subterrânea*, vol. 01, n. 03, p. 11- 16. 1973.
- SOUZA, S.L. Projeto Cafarnaum. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. Convênio Secretaria de Minas e Energia do Estado da Bahia - Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. Relatório Final, 245p. 1988.

- SOUZA; S.L.; et al. Análise faciológica e metalogenética da bacia de Irecê, Bahia. Relatório Final, Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, Textos, vol 1, 110p. 2002.
- TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v. 8, n. 2, p. 127-150, may, 1979.
- UNITED STATE GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Landsat 8. Reston: USGS, 2015. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 31 dez. 2015.
- VAN ZUIDAM, R.; VAN ZUIDAM-CANCELADO, F. I. **Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photographs**. Enschede: ITC Books, 1979
- VANDENSCHRICK G.; et al. 2002. Using stable isotope analysis (δD - $\delta^{18}O$) to characterize the regional hydrology of the Sierra de Gador, south east Spain. *J. Hydrol.*, 265:43-55, 2002.
- VERSTAPPEN, H. T.; VAN ZUIDAM, R.A. **The ITC system of geomorphologic survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards**. Enschede: ITC Books, 1991.
- VERSTAPPEN, H.T. *Remote Sensing in Geomorphology*. Amersterdam: Elsevier, 1977.
- Verstappen, H.T. **Applied Geomorphology: Geomorphological survey for environmental development**. Amersterdam: Elsevier, 1983.

CAPÍTULO IV

CONCLUSÕES

A presente tese vem a preencher uma lacuna no conhecimento da vulnerabilidade a contaminação de aquíferos cársticos.

A elaboração do mapa da vulnerabilidade do aquífero à contaminação através do método proposto contribuiu para a espacialização desta nas Bacia Hidrográficas do rio Jacaré e Verde, Bahia; e por sua vez representa uma importante ferramenta para gestão das águas subterrâneas, colaborando para manutenção e reconhecimento da qualidade das águas subterrâneas e para o manejo e gestão ambiental, visando à manutenção dos recursos hídricos subterrâneos em excelente estado para atuais e futuras gerações.

Com esse trabalho foi possível apresentar quais as regiões são mais vulneráveis a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos, tão utilizados atualmente pelas comunidades. Com esses dados pode-se estabelecer antes da construção de poços tubulares, a qualidade desta água através dos dados de vulnerabilidade a contaminação nestas Bacias Hidrográficas.

Após a conclusão deste trabalho, vale ainda salientar a importância das imagens de sensoriamento remoto e das ferramentas inseridas no Sistema de Informação Geográfica, uma vez que a partir das informações prestadas nesse cadastramento, podem ser desenvolvidos estudos com a finalidade de melhor gerenciamento e conservação das águas subterrâneas.

No artigo I foi apresentado a aplicação dos métodos tradicionais de avaliação da vulnerabilidade a contaminação de aquíferos, o GOD e o EPIK. Na sua análise pode-se constatar que a forma do relevo devem ser consideradas, principalmente nas áreas cársticas, por estar relacionado diretamente com a dinâmica ambiental.

O artigo II apresenta a proposta de um novo método de avaliação da vulnerabilidade a contaminação, explorando a potencialidade das ferramentas de análise morfométrica e processamento digital de imagens inseridas no Sistema de Informação Geográfica (SIG).

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA

Diretrizes para Autores

Cadastro

Entrar na página da revista: <http://aguassubterraneas.abas.org/>
Clicar em “CADASTRO” e preencher o formulário. Não esquecer de ativar as caixas de “LEITOR” e “AUTOR”

Submissão

1. Entrar na página da revista: <http://aguassubterraneas.abas.org/> e clicar em “PÁGINA DO USUÁRIO”
2. Clicar em “AUTOR”
3. Na página “SUBMISSÕES ATIVAS”, clicar em “Clique aqui para iniciar o processo de Submissão” (final da página) ou em “NOVA SUBMISSÃO” (coluna à direita).
4. Na página seguinte: “PASSO 1. INICIAR SUBMISSÃO”, ativar a caixa “DECLARAÇÃO DE DIREITO AUTORAL” e escolher a seção apropriada para a submissão (= “ARTIGOS”).
5. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
6. Na página seguinte: “PASSO 2. METADADOS DA SUBMISSÃO (INDEXAÇÃO)”, incluir os nomes dos autores e seus respectivos e-mails.
7. Complete o resto do formulário com os dados do artigo: Título, resumo, abstract, indexação e agência de fomento.
8. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
9. Na página seguinte: “PASSO 3. TRANSFERÊNCIA DO MANUSCRITO”, leia os itens 1 a 5 e, principalmente, o texto vinculado ao link “Assegurando uma Avaliação Cega segura”
10. Para transferir o arquivo, clicar em “PROCURAR”. Na janela “PROCURAR ARQUIVO” selecionar o arquivo e clicar em “ABRIR”. O nome do arquivo aparecerá ao lado do botão Browse. Clicar em “TRANSFERIR”.
11. Sob o título “DOCUMENTO DE SUBMISSÃO”, aparecerão os dados do arquivo. Por exemplo:

Nome do documento:	9588-29437-1-SM.doc
Nome original do Documento:	Drumond.doc
Tamanho do Documento:	19KB
Data de transferência:	2007/10/19 11:48 AM
12. Conferir os dados e clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
13. Na página seguinte: “PASSO 4. TRANSFERÊNCIA DE DOCUMENTOS SUPLEMENTARES”, repetir os passos do item “TRANSFERÊNCIA DE ARQUIVOS”, caso tenha algum documento complementar a ser enviado.
14. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
15. Na página seguinte: “PASSO 5. CONFIRMAÇÃO DA SUBMISSÃO”. Conferir os dados informados em “RESUMO DE DOCUMENTOS” e clicar em “CONCLUIR SUBMISSÃO”

Visualização do Andamento da Submissão

1. O autor poderá acompanhar o andamento da avaliação. Para isso, basta acessar o sistema, localizar o nome do artigo submetido e clicar no link da coluna “SITUAÇÃO”, por exemplo: “Em fila para Avaliação”
2. Os arquivos com os comentários dos revisores estarão disponíveis para leitura ou para baixar no computador, em “POR PARES”. Basta clicar no nome do “DOCUMENTO TRANSFERIDO”, que surgirá a opção para abrir ou baixar o arquivo.

Orientações para Preparação do Artigo

O trabalho submetido para avaliação preliminar deverá ser submetido em programa Word for Windows ou compatível, fonte Arial, tamanho 12, espaçamento duplo, em papel A4, margens de 2,5 cm, sem numeração de páginas e ter, no máximo, 20 páginas, já incluindo figuras e tabelas.

O documento deverá ter a numeração de linhas visível e contínua a partir do seu título, visando acelerar o processo de revisão pelos pares.

IMPORTANTE: O(s) nome(s) do(s) autor(es), sua(s) instituição(ões) e endereço(s) para correspondências NÃO DEVEM CONSTAR do texto, a identificação do trabalho será feita pelo preenchimento dos metadados da submissão e pelo número de identificação gerado automaticamente. Referências a publicação(ões) do(s) autor(es) dentro do texto ou na lista de referências devem aparecer somente como "AUTOR", de modo a garantir uma avaliação cega segura.

Serão aceitos trabalhos em **Português, Espanhol e Inglês** e serão publicados no idioma em que foi redigido originalmente. Os artigos deverão, obrigatoriamente, apresentar resumo em Português e Inglês. Além disso, caso o idioma escolhido não seja o Português, o título deverá obrigatoriamente ser apresentado secundariamente nesse idioma, sendo mantido o título original no idioma do artigo. O **título** do trabalho, com no máximo 140 toques, deverá aparecer na primeira página do trabalho, sem a identificação do(s) autor(es).

Antecedendo o texto serão apresentados dois **resumos** em Português e Inglês. Para trabalhos redigidos em Espanhol, o segundo resumo será em Português e o terceiro em Inglês. O resumo deverá ser redigido em parágrafo único, variando entre 1.000 a 1.500 toques, apresentando de forma breve e objetiva a justificativa do trabalho, os métodos utilizados, os resultados e as conclusões. Após o resumo, incluir obrigatoriamente uma lista de até cinco palavras-chave que expressem o assunto do trabalho.

O texto deverá ser redigido de forma impessoal, objetiva, clara, precisa e coerente.

O título do trabalho, bem como os das tabelas e figuras deverão ser apresentados no idioma do trabalho e em Inglês. As abreviaturas deverão ser identificadas, por extenso, na primeira vez que aparecem no texto. As unidades das grandezas numéricas deverão obedecer aos padrões do Sistema Internacional de Unidades (SI).

As **tabelas** serão numeradas seqüencialmente e inseridas normalmente dentro do texto. O título deve ser claro e conciso e colocado no topo da tabela. Outras informações relativas à tabela (origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da tabela, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal.

As **figuras** (mapas, fotos, perfis, esboços, gráficos, diagramas, etc.), devem ser numeradas seqüencialmente. O título deve ser claro e conciso e colocado na base da figura. Outras informações relativas à figura (legenda, origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da figura, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal. As figuras devem ser preparadas em alta resolução (maiores que 1Mb). Para uma boa legibilidade, os símbolos e caracteres de texto das figuras devem ter tamanho mínimo de 1 mm, mesmo após a redução da figura.

As **citações** mencionadas no texto devem ser indicadas pelo sistema Autor-Data, obedecendo a norma ABNT NBR 10.520 (agosto/2002), ou a que estiver vigente.

Informações Adicionais

Ao submeter o artigo à Revista Águas Subterrâneas, os autores declaram conjuntamente que consentem com a publicação do trabalho, com aceitação das recomendações dos relatores e a confirmação de não publicação em nenhum outro veículo enquanto estiver sendo avaliado pelos membros do Corpo Consultivo da revista.

A avaliação dos manuscritos é duplamente cega, isto é, tanto os avaliadores quanto os autores não tem acesso às identidades uns dos outros. O trabalho será submetido a pelo menos 3 (três) avaliadores, os quais emitirão pareceres independentes recomendando ou não sua publicação, havendo ou não a necessidade de revisão do texto. Em caso de trabalho não aceito, será feito um comunicado aos autores informando, sucintamente, o motivo da recusa para publicação.

Após a adaptação do texto às recomendações dos avaliadores e editores, os autores enviarão ao Comitê Editorial uma cópia em meio digital para a análise final do trabalho. Os editores reservam-se o direito de fazer adaptações na forma do texto para manter a uniformidade da revista.

Antes da impressão da revista, os editores disponibilizarão no próprio sistema uma prova do trabalho para verificação e correção de possíveis erros de digitação e/ou diagramação. Nesta etapa, não serão admitidas quaisquer alterações no conteúdo do texto. Os autores deverão se manifestar sobre a aceitação da prova no prazo de 5 (cinco) dias. Excedido esse prazo, o artigo será considerado pronto para impressão.

Condições para submissão

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

1. Este documento submetido para a Revista Águas Subterrâneas é original, não tendo sido publicado no todo ou em parte em outro periódico ou anais de evento

Declaração de Direito Autoral

Direitos Autorais para artigos publicados nesta revista são do autor, com direitos de primeira publicação para a revista. Em virtude de aparecerem nesta revista de acesso público, os artigos são de uso gratuito, com atribuições próprias, em aplicações educacionais e não-comerciais.

Política de Privacidade

Os nomes e endereços de email neste site serão usados exclusivamente para os propósitos da revista, não estando disponíveis para outros fins.

Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ

Normas para Publicação

1. O Anuário do Instituto de Geociências é uma publicação oficial da Universidade Federal do Rio de Janeiro – Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, destinando-se à divulgação da produção científica de interesse amplo e caráter original relacionada com as Geociências. Ao submeter um artigo, o autor(es) do mesmo está realizando de maneira automática a transferência de direitos autorais ao Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ.
2. O Anuário do Instituto de Geociências publica Artigos e Comunicações, no âmbito das Geociências.
3. Os textos podem ser redigidos em português, francês, espanhol ou inglês em papel A4.
4. Artigos - podem conter até 15 páginas digitadas em espaço duplo, incluindo ilustrações e referências bibliográficas. Textos maiores poderão ser publicados mediante pagamento dos custos de produção.
5. Comunicações - podem conter até 5 páginas digitadas em espaço duplo, incluindo ilustrações e referências. Destinam-se a divulgar resumos de importantes descobertas recentes.

Preparação Para Encaminhamento

a) Textos

6. Artigos e Comunicações

Uma primeira folha com o título, número de figuras e o índice. Da segunda folha em diante, em sequência, o título, nome completo do(s) autor (es), endereço (caixa postal, logradouro, email, CEP, cidade e Estado), Resumo, Abstract, texto completo, referências e ilustrações.

Inserir textos explicativos das ilustrações no corpo do texto, na posição aproximada onde deverão aparecer.

Hierarquizar os títulos e subtítulos em 1, 1.1, 2, 2.1, 2.2 etc.

O Resumo e Abstract devem ter até 25 linhas em Artigos (para textos redigidos em inglês) e até 10 linhas em Comunicações, e serem seguidos de palavras-chave e Keywords, respectivamente.

Artigos em português, espanhol ou francês deverão ter o título vertido para a língua inglesa, em maiúsculas, colocado após a palavra Abstract. Submeter 3 cópias xerográficas, de boa qualidade, do texto, tabelas e ilustrações. Editar o texto e tabelas em Word for Windows, fonte Times New Roman, tamanho 12. As linhas de texto alinhadas à esquerda e em espaço duplo. Todas as margens devem ter 2,5 cm.

Digitar as tabelas no modo TABELA. Não remeter CDs e originais.

b) Ilustrações

7. As ilustrações gráficas, fotográficas e fotomicrográficas serão numeradas sequencialmente, na ordem de sua citação no texto, e consideradas, mesmo pranchas, indiscriminadamente como Figuras.

Não serão aceitos encartes. Todas as ilustrações deverão ser preparadas de forma digitalizada em formato .tiff com resolução de 600dpi.

8. Legendas e símbolos das ilustrações devem ter dimensões adequadas para permitir legibilidade em eventuais reduções.

Explicar todos os símbolos. Colocar escalas gráficas dentro da área das ilustrações. As figuras devem ser preparadas de modo a otimizar o espaço disponível.

c) Referências

9. Citações no corpo do texto, seguir os formatos do seguinte exemplo:

Lima (1999), Lima & Silva (1992 a, b), e para três autores ou mais, Lima et al. (2002).

10. Ao final do texto, ordenar as referências na ordem alfabética do sobrenome do primeiro autor, empregando os seguintes formatos:

Artigos de Periódicos:

Pereira, R.; Guimarães Jr., J.A. & Silva Jr., G.C. 2002. Avaliação do Impacto da Captação de Água na Lagoa do Bomfim, RN - Brasil. *Revista Águas Subterrâneas*, 16 (1): 61 - 68.

Souza, M.L. 1997. Algumas Notas Sobre a Importância do Espaço para o Desenvolvimento Social. *Território*, 3: 13-35.

Artigos de Publicações Seriadas:

Vicalvi, M.A.; Kotzian, S.C.B. & Forti-Esteves, I.R. 1977. A Ocorrência de Microfauna Estuarina no Quaternário da Plataforma Continental de São Paulo. In: *Evolução Sedimentar Holocênica da Plataforma Continental e do Talude do Sul do Brasil*, Rio de Janeiro, CENPES/DINTEP, p. 77 - 97. (Série Projeto REMAC 2).

Dissertações e Teses

Caita, M.B.F. 2000. Angola: Estado-Nação, Movimentos Sociais e Disputas Territoriais. O Caso da Província de Ngagela. Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 67p.

Artigos Publicados em Eventos

Dias - Brito, D. 1992. Ocorrências de Calcisferas em Depósitos Carbonáticos do Atlântico Sul: Impacto na Configuração Paleoceanográfica do Tétis Cretácico. In: *SIMPÓSIO SOBRE ASBACIAS CRETÁCIAS BRASILEIRAS*, 2, Rio Claro, 1992. Resumos Expandidos, Rio Claro, UNESP, p. 30-34.

Livros:

Becker, B. & Egler, C. 1993. *Brasil: Uma Nova Potência Regional na Economia-mundo*. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil. 267 p.

Capítulos de livros:

Wanderley, M. D. 2004. Nanofósseis Calcários. In: CARVALHO, I. S. (ed.). *Paleontologia*. Editora Interciência, p. 285-296.

Análise Pelo Corpo Consultivo

11. Artigos e Comunicações serão submetidos à análise crítica de pelo menos dois consultores ad hoc e/ou analisados pelo Editor ou Conselho Editorial. Textos não aceitos para publicação serão devolvidos ao autor principal.

Procedimentos Após Análise

12. Artigos e Comunicações serão encaminhados para revisão pelo(s) autor(es), acompanhados de uma lista de recomendações editoriais.

Após a realização de todas as correções indicadas deverão ser encaminhados os CDs referentes ao texto e imagens (formato .tiff), bem como cópia impressa em papel A4.

Provas e Separatas

13. Provas dos Artigos e Comunicações, serão remetidas aos autores (arquivo no formato PDF) para correção antes da impressão.

Alterações necessárias deverão ser encaminhadas manuscritas na prova do arquivo PDF.

14. Separatas serão fornecidas mediante o pagamento dos custos de impressão.