

APLICAÇÃO DO MÉTODO COP PARA AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE INTRÍNSECA À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO CÁRSTICO SALITRE, IRECÊ-BA, BRASIL.

VILLANUEVA, T. C. B.^{1*}; BASTOS LEAL, L. R.²; ZUCCHI, M. DO R.³; AZEVEDO, A. E. G. DE⁴ & VILLANUEVA, P. R.⁵

1 - Serviço Geológico do Brasil - CPRM, Brasília-DF.

2- Instituto de Geociências - Universidade Federal da Bahia.

3 - Laboratório de Física Nuclear Aplicada - Universidade Federal da Bahia.

4 - Laboratório de Física Nuclear Aplicada - Universidade Federal da Bahia.

5 - Ministério do Meio Ambiente, Brasília-DF.

*Corresponding author: tereza.villanueva@cprm.gov.br

ABSTRACT

Villanueva, T. C. B.; Bastos Leal, L. R.; Zucchi, M. do R.; Azevedo, A. E. G. de & Villanueva, P. R., 2015. APPLICATION OF THE METHOD COP FOR ASSESSMENT THE IMPLICIT VULNERABILITIE CONTAMINATION IN KARST AQUIFER, IN THE REGION OF IRECÊ-BA, BRAZIL. Braz. J. Aquat. Sci. Technol. 19(1). eISSN 1983-9057. DOI: 10.14210/ bjust. v19n1. The study area is located in the micro-Irecê, located in the central-northern state of Bahia, Brazil. Includes a pilot area of the karst aquifer Salitre, about 250 km², bounded by the municipalities of Irecê and Lapão. Constituted by carbonate rocks of Neoproterozoic age Salitre Formation. To determine the intrinsic vulnerability to contamination of the aquifer in the COP Method was used, and for that, some products were generated for use in modeling, such as soil particle size analysis, development of the Hydrogeological Map, Map of Slope, Map Sinkholes and Fractures and Use Map and Land Use, scale 1:25,000. These products have enabled the generation of the Intrinsic Vulnerability Map of the Contamination area, which presented a zoning as a result of vulnerability that allowed the delineation of three classes of intrinsic vulnerability in the area: Moderate (53%), Low (40%) and Very High (7%). The results obtained can be used for planning, water management and land area.

Keywords: COP Method, Karst aquifer, Intrinsic vulnerability map of the contamination.

INTRODUÇÃO

O monitoramento das águas subterrâneas, de acordo com o manual da UNESCO (Vrba & Soblsek, 1988), é um dos instrumentos mais importantes para a viabilização de estratégias e políticas de proteção e conservação desses recursos. A implantação de programas de monitoramento das águas subterrâneas auxilia na melhoria do seu planejamento, proteção e manejo. Dessa forma, a cartografia de vulnerabilidade de aquíferos aplicada à contaminação é um dos métodos mais adequados para contribuir com a preservação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

Vrba & Zaporozec (1994) analisaram várias técnicas de mapeamento de vulnerabilidade com aplicações em aquíferos distintos e constataram a sua utilização, sobretudo, para resolver problemas de contaminação em áreas críticas. Esta situação tem demonstrado que é mais interessante desenvolver programas preventivos de proteção aos aquíferos do que aplicar técnicas de remediação da contaminação instalada. Portanto, foi constatado por Andreo et al. (2002), que a cartografia de vulnerabilidade é uma ferramenta preventiva que permite determinar, à priori, a capacidade de proteção natural desses sistemas e

distinguir quais são as zonas que necessitam de medidas de mitigação e redução dos potenciais perigos de contaminação.

De acordo com Goldscheider (2002), a cartografia de vulnerabilidade aplicada à determinação de processos de contaminação em aquíferos cársticos apresenta uma grande relevância devido à sua complexidade quando comparada aos aquíferos granulares, por exemplo, por ser um sistema de elevada heterogeneidade. Desta forma, estes aquíferos são particularmente vulneráveis à contaminação devido a fatores como: baixa espessura dos solos, concentração de fraturamentos e carstificação nas camadas superiores do aquífero, além da ocorrência de pontos de recarga em cavidades e condutos formados pelo processo de carstificação, que propiciam a penetração e o transporte de contaminantes nesse sistema.

A escolha do tema na área em questão, de acordo com Nossa (2011), deve-se ao fato de ser um ambiente em que o aquífero apresenta um elevado potencial de vulnerabilidade intrínseca, por ser constituído por rochas carbonáticas, com estruturas cársticas e elevado grau de fraturamentos, onde são desenvolvidas atividades antrópicas potencialmente contaminantes como agricultura irrigada com o uso de agrotóxicos, mineração, disposição de resíduos

sólidos em locais inadequados e problemas relacionados com a ausência de saneamento básico nas zonas urbanas das cidades de Irecê e Lapão.

Desta forma, faz-se necessário a seleção e aplicação de uma metodologia compatível com a área de estudo, como a Metodologia COP, que vise detectar possíveis processos de contaminação ocasionados pelas potenciais fontes de contaminação mencionadas, de forma a determinar os locais que necessitam de maior proteção das águas subterrâneas frente a esses processos. Além da ação antrópica, a composição química natural das águas na área é influenciada pela dissolução química das rochas calcárias, resultando em grande parte em águas salobras, restringindo-as para o consumo humano.

Caracterização da Área

A área de pesquisa é formada por um polígono que compreende parte dos municípios de Irecê e Lapão, no estado da Bahia, com uma área de aproximadamente 250km².

A litologia é formada por rochas essencialmente carbonáticas (calclutitos, calcissiltitos, calcarenitos, dolomitos, laminitos algais e margas) da Formação Salitre de idade Neoproterozóica, caracterizada como paleoambiente deposicional continental e marinho de águas rasas (Pedreira et al., 1987), com feições cársticas bem desenvolvidas, que juntamente com zonas de fraturamento, constituem os reservatórios de grande expressividade do ponto de vista de recepção, armazenamento e circulação de águas subterrâneas.

Revisão de Literatura

Cartografia de vulnerabilidade de aquíferos cársticos

O conceito de vulnerabilidade foi preliminarmente utilizado por Le Grand (1964), nos EUA, por Albinet & Margat (1970), na França e por Taltasse (1972), no Brasil. Os trabalhos de Aller et al. (1987), Bachmat & Collin (1987) e Foster & Hirata (1988) destacaram-se nos anos 80.

Vulnerabilidade é definida por Vrba & Zaporozec (1994) como uma propriedade intrínseca do sistema de águas subterrâneas que depende da sensibilidade do mesmo aos impactos humanos e/ou naturais.

As bases para a evolução da cartografia de vulnerabilidade intrínseca foram definidas por Vrba & Zaporozec (1994) e, posteriormente, por Zwahlen (2004), que propuseram uma distinção entre os conceitos de vulnerabilidade intrínseca e específica, definidas como:

- Vulnerabilidade Intrínseca: é a susceptibilidade de um aquífero à contaminação natural, em função de suas características geológicas e hidrogeológi-

cas, independente da natureza dos contaminantes, considerando-se também os atributos do meio, como os condicionantes climáticos da área.

- Vulnerabilidade Específica: é a susceptibilidade de um aquífero a um contaminante ou grupo de contaminantes em função de suas características e relações com os componentes da vulnerabilidade intrínseca.

Existem vários métodos para avaliar a vulnerabilidade intrínseca à contaminação em aquíferos cársticos, dentre os quais se destacam os métodos EPIK (Doerfliger & Zwahlen, 1997), PI (Goldscheider, 2002) e COP (Vías et al., 2002, 2006).

Desta forma, o emprego da cartografia de vulnerabilidade é um instrumento útil e eficaz para a prevenção do processo de contaminação. A utilização de uma cartografia específica para cada tipo de contaminante é uma tarefa que demanda um elevado custo econômico e temporal, uma vez que, muitas substâncias podem afetar o aquífero e teriam, portanto, que ser analisadas.

MATERIAIS E METODOS

Toda a sequência metodológica descrita à seguir foi pormenorizada no trabalho de Nossa (2011).

Método COP

No Brasil não existem metodologias específicas para a determinação da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos cársticos. Desta forma, foi selecionada a metodologia COP desenvolvida por Vías et al. (2002, 2006), para efetuar a avaliação exposta no presente artigo.

A metodologia COP foi originada em locais de clima semi-árido da Espanha, similar às condições climáticas da área de estudo. Essa metodologia tem sido aplicada em vários países do mundo, com bons resultados em comparação com outros métodos de avaliação de vulnerabilidade, sendo constatado por Vías et al. (2006), Ravbar (2007) e Baldi et al. (2009). Tem sido aplicada também nos países da União Européia (Andreo et al., 2006), em função da sua baixa subjetividade por trabalhar com parâmetros quantitativos.

São estabelecidos índices de vulnerabilidade correspondentes a cada classe de vulnerabilidade. Esses índices são agrupados em cinco classes de variação (muito alta, alta, moderada, baixa e muito baixa), variando em intervalos de (0 a 15), indicando para valores mais baixos, uma maior vulnerabilidade (Figura 1). É uma metodologia utilizada com sucesso em aquíferos cársticos, considerando diferentes graus de

carstificação e sistemas de fluxo, tanto concentrados como difusos, podendo ser submetidos a diferentes condições climáticas, para condições específicas de Concentração do Fluxo (C), Cobertura da Zona

Tabela 1: Representação do Método COP, traduzido de Vias et al. (2002, 2006), demonstrando as características dos fatores C, O e P; contendo a forma de obtenção dos valores numéricos, bem como os intervalos considerados.

Fator	Subfator	Variável	Valor		
C	Cenário A: Áreas de recarga (cavidades cársticas)	Distância dos sumidouros (dh)	<ul style="list-style-type: none"> ■ < 500 m ■ 500 – 1000 m ■ 1000 – 1500 m ■ 1500 – 2000 m ■ 2000 – 2500 m ■ 2500 – 3000 m ■ 3000 – 3500 m ■ 3500 – 4000 m ■ 4000 – 4500 m ■ 4500 – 5000 m ■ > 5000 m 	<ul style="list-style-type: none"> 0,0 0,1 0,2 0,3 0,4 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 	
		Distância das Dolinas (ds)	<ul style="list-style-type: none"> ■ < 10 m ■ 10 – 100 m ■ > 100 m ou com estas feições ausentes 	<ul style="list-style-type: none"> 0,0 0,5 1,0 	
		Declividade e Cobertura Vegetal (sv)	<ul style="list-style-type: none"> ■ < 8 % ■ 8 – 31 %, elevada ■ 31 – 76 %, pouca ou ausente ■ 31 – 76 %, pouca ou ausente ■ > 76 % 	<ul style="list-style-type: none"> 1,00 0,95 0,90 0,85 0,80 0,75 	
	Cenário B: Demais áreas do aquífero	Feições Cársticas e Camadas Superficiais (sf)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Carste muito desenvolvido, ausente ■ Carste muito desenvolvido, permeável ■ Carste muito desenvolvido, impermeável ■ Carste pouco desenvolvido, ausente ■ Carste pouco desenvolvido, permeável ■ Carste pouco desenvolvido, impermeável 	<ul style="list-style-type: none"> 0,25 0,50 0,75 0,50 0,75 1,00 	
			<ul style="list-style-type: none"> ■ Carste fissurado, ausente ■ Carste fissurado, permeável ■ Carste fissurado, impermeável ■ Ausência de feições cársticas, ausente ■ Ausência de feições cársticas, permeável ■ Ausência de feições cársticas, impermeável 	<ul style="list-style-type: none"> 0,75 0,75 1,00 1,00 1,00 1,00 	
		Declividade e Cobertura Vegetal (sv)	<ul style="list-style-type: none"> ■ < 8 % ■ 8 – 31 %, elevada ■ 8 – 31 %, pouca ou ausente ■ 31 – 76 %, elevada ■ 31 – 76 %, pouca ou ausente ■ > 76 % 	<ul style="list-style-type: none"> 0,75 0,80 0,85 0,90 0,95 1,00 	
O	Solo [O _s]	Textura e Espessura (m)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Argiloso > 1 m ■ Argiloso 0,5 - 1 m ■ Argiloso < 0,5 m ■ Silteoso > 1 m ■ Silteoso 0,5 - 1 m ■ Silteoso < 0,5 m ■ Argilo-arenoso > 1 m ■ Argilo-arenoso 0,5 - 1,0 m ■ Argilo-arenoso < 0,5 m ■ Arenoso > 1 m ■ Arenoso 0,5 - 1 m ■ Arenoso < 0,5 m (ausência de solo) 	<ul style="list-style-type: none"> 5,0 4,0 3,0 4,0 3,0 2,0 3,0 2,0 1,0 2,0 1,0 0 	
		Litologia [O _L]	Litologia e Fraturamento (ly)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Argila ■ Silte ■ Metapelitos e rochas ígneas não fraturadas ■ Calcários com margas ■ Metapelitos e rochas ígneas fraturados ■ Conglomerados e brechas cimentados ou não fraturados ■ Arenitos ■ Conglomerados e brechas pouco fraturados ou cimentados ■ Areia e cascalho ■ Basaltos fraturados ■ Rochas cársticas fraturadas ■ Rochas cársticas não fraturadas 	<ul style="list-style-type: none"> 1500 1200 1000 500 400 100 60 40 10 5 3 1
	Condições de Confinamento (cn)			<ul style="list-style-type: none"> ■ Confinado ■ Semi-confinado ■ Não confinado 	<ul style="list-style-type: none"> 2,0 1,5 1,0
	Espessura da litologia considerada (m)		<ul style="list-style-type: none"> ■ < 250 m ■ 250 – 1.000 m ■ > 1.000 – 2.500 m ■ > 2.500 – 10.000 m ■ > 10.000 m 	<ul style="list-style-type: none"> 1 2 3 4 5 	
	P	Quantidade [P _q]	Média anual das precipitações no período chuvoso	<ul style="list-style-type: none"> ■ > 1600 mm/ ano ■ 1200 e ≤ 1600 mm/ ano ■ > 800 e ≤ 1200 mm/ ano ■ > 400 e ≤ 800 mm/ ano ■ < 400 mm/ ano 	<ul style="list-style-type: none"> 0,4 0,3 0,2 0,3 0,4
		Intensidade [P _i]	Distribuição temporal	<ul style="list-style-type: none"> ■ < 10 mm/ dia ■ 10 e ≤ 20 mm/ dia ■ > 20 mm/ dia 	<ul style="list-style-type: none"> 0,6 0,4 0,2

Saturada (O) e Precipitação (P), a serem consideradas na área de estudo (Tabela 1).

De acordo com Vias et al. (2002, 2006) os fatores C, O e P são descritos e obtidos da seguinte forma, de acordo com a Tabela 1:

O fator (C) representa a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, em função da infiltração da água através da camada de proteção. Dessa forma, este fator representa o grau com que as águas das chuvas atravessam a zona não saturada e infiltram no interior das cavidades cársticas.

A avaliação do fator (C) considera quatro variáveis: a distância das áreas de recarga para as áreas de sumidouros (dh) e dolinas (ds) e a influência da declividade (s) e da vegetação (v). A vulnerabilidade do aquífero é reduzida com o aumento da distância entre as áreas de recarga e as dolinas e sumidouros. Com relação ao índice referente à cobertura vegetal, considera-se baixo para áreas com menos que 20%-30% de vegetação. A declividade subdivide-se em quatro classes e correlaciona-se com a presença ou ausência da cobertura vegetal e essa combinação origina o parâmetro (sv). Esses valores demonstram que quando a declividade aumenta, a vegetação tende a ser mais escassa e a vulnerabilidade tende a aumentar, nesses casos observam-se valores de (sv) próximos de 1,0. O fator (C) é obtido através da expressão:

$$\text{Fator (C)} = sv.ds \text{ ou } sv.dh$$

O fator (O) considera a proteção fornecida para o aquífero em função de propriedades físicas, como textura, litologia e espessura das camadas acima da zona saturada. Para avaliação do fator (O) foi considerado o subfator solo [O_s] e o subfator litologia [O_L] da zona não saturada.

Alguns parâmetros são considerados para a avaliação do subfator solo [O_s], como textura, distribuição do tamanho dos grãos e espessura. O subfator litologia [O_L] reflete a capacidade de atenuação de cada camada da zona não saturada.

O critério para a quantificação do fator (O) é o tipo de rocha e o grau de fraturamento (ly), bem como a espessura de cada camada (m) e as condições de confinamento (cn). O somatório do produto dos subfatores, origina um índice que é associado com a proteção do aquífero: $\Sigma [ly \cdot m]$.

O parâmetro (cn) equivale às condições de confinamento às quais estão submetidas o aquífero. Desta forma, para aquíferos não confinados (cn = 1).

A capacidade de atenuação de contaminantes aumenta proporcionalmente com o aumento das camadas de proteção. O fator (O) é obtido pelo somatório dos subfatores solo [O_s] e litologia [O_L].

Desta forma:

$$O_L = \sum [ly \cdot m] \cdot cn$$

$$\text{Fator O} = [O_S] + [O_L]$$

Valores mais baixos do fator (O) implicam em uma elevada vulnerabilidade intrínseca e correspondem à áreas em que o solo é pobremente desenvolvido ou ausente.

O fator (P) inclui tanto a quantidade de precipitação na área, como também fatores que influenciam na taxa de infiltração, como: frequência, distribuição temporal, duração e intensidade de eventos de chuvas extremas. Esses fatores determinam a atuação da precipitação no transporte de contaminantes da superfície para o aquífero. Quanto maior for a capaci-

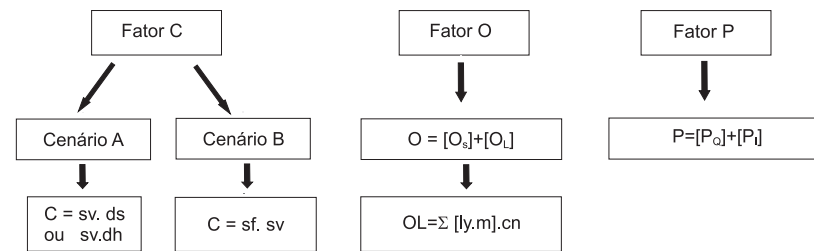
dade de transporte de contaminantes, maior será a vulnerabilidade do aquífero.

O fator (P) é avaliado por dois subfatores: quantidade de precipitação $[P_o]$ e distribuição temporal da precipitação $[P_t]$.

O subfator $[P_o]$ descreve o efeito da quantidade de chuvas e a recarga anual que contribuem para a vulnerabilidade do aquífero, o que corresponde à média anual de chuvas das séries históricas dos anos úmidos e o subfator $[P_t]$ indica como as chuvas se distribuem ao longo do tempo considerado.

O fator (P) considera a precipitação média dos anos úmidos, pois é quando o nível piezométrico está mais próximo da superfície topográfica e o aquífero, nesse momento, é mais vulnerável à contaminação.

A Figura 1 ilustra perfeitamente como os fatores C, O e P são calculados, bem como as classes e intervalos de valores de vulnerabilidade do Método COP (Tabela 1), de acordo com Vias et al. (2002, 2006).



Fator C	Redução da Proteção
[0 - 0,2]	Muito alta
[0,2 - 0,4]	Alta
[0,4 - 0,6]	Moderada
[0,6 - 0,8]	Baixa
[0,8 - 1,0]	Muito Baixa

Fator P	Redução da Proteção
[0,4 - 0,5]	Muito alta
[0,6]	Alta
[0,7]	Moderada
[0,8]	Baixa
[0,9 - 1,0]	Muito Baixa

Σ [ly.m]	Valor
[0 - 250]	1
[250 - 1.000]	2
[1.000 - 2.500]	3
[2.500 - 10.000]	4
[>10.000]	5

Fator O	Valor da Proteção
[1]	Muito alta
[2]	Alta
[2 - 4]	Moderada
[4 - 8]	Baixa
[8 - 15]	Muito Baixa

$$\text{Índice COP} = \text{Fator C} \times \text{Fator O} \times \text{Fator P}$$

Índice COP	Classes de Vulnerabilidade
[0 - 0,5]	Muito alta
[0,5 - 1,0]	Alta
[1,0 - 2,0]	Moderada
[2,0 - 4,0]	Baixa
[4,0 - 15]	Muito Baixa

Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação -MÉTODO COP-

Figura 1: Figura ilustrativa dos intervalos e classes de vulnerabilidade do Método COP (Vias et al. 2002, 2006).

Análise granulométrica dos solos

Os solos foram coletados, sobretudo, para a determinação da análise granulométrica, de forma a utilizar os resultados no modelamento do Método COP (Vías et al., 2002, 2006), (Tabelas 1 e 2).

As análises granulométricas foram realizadas no granulômetro a laser Horiba LA 950, no Laboratório de Estudos Costeiros da Universidade Federal da Bahia (LEC/UFBA), perfazendo 17 amostras de solos coletados a 50cm de profundidade. Os dados foram tratados com o software Gradistat 4,0.

Mapa Hidrogeológico

Para a elaboração das superfícies piezométricas, foi selecionada uma malha de amostragem composta por 36 poços tubulares inativos, selecionados para medida de nível estático (NE), utilizando-se um medidor eletrônico que realiza a medida da profundidade do nível estático no interior de cada poço, considerada em relação à base do terreno. A cota dos poços foi medida com o GPS diferencial (DGPS). A geração do mapa piezométrico, possibilitou a determinação das direções de fluxos subsuperficiais do aquífero Salitre para a elaboração do Mapa Hidrogeológico da área, escala 1:25.000 (Figura 2).

Mapa de Dolinas e Fraturas

O Mapa de Dolinas e Fraturas (Figura 3) é formado fundamentalmente por fraturas e dolinas. Foi elaborado em escala 1:25.000, com o levantamento dessas feições em campo, aliado à sua delimitação em imagens AVNIR-2/ALOS (IBGE, 2007), com resolução 10m x 10m, utilizando-se o software ENVI 4.5 e realização dos devidos ajustes efetuados em trabalhos de campo.

Mapa de Declividade

O Mapa de Declividade da área (Figura 4), foi elaborado em escala 1:25.000, com base no modelo digital de terreno (MDT), a partir de imagens de radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), aliado a informações obtidas em trabalhos de campo, de forma a melhorar a precisão e a confiabilidade dos dados.

Mapa de Uso e Ocupação dos Solos

O Mapa de Uso e Ocupação dos Solos da área (Figura 5), foi produzido em escala 1:25.000, através do levantamento das classes de uso e ocupação dos solos, realizado em trabalhos de campo e composição das feições, através da determinação de padrões visuais e do tratamento de imagens AVNIR-2/ALOS (IBGE, 2007), com resolução de 10m x 10m, utilizando-se o software ENVI 4.5.

Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação - Método COP

O Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação, de acordo com Vías et al. (2002, 2006) foi obtido com base na análise da ponderação dos atributos discriminados na Tabela 1, nos cálculos efetuados de acordo com os parâmetros considerados na Figura 1 e nos mapas temáticos gerados: Mapa Hidrogeológico (Figura 2), Mapa de Dolinas e Fraturas (Figura 3), Mapa de Declividade (Figura 4) e Mapa de Uso e Ocupação dos Solos (Figura 5).

A análise dos mapas temáticos salienta a importância da elaboração prévia destes mapas, de forma a possibilitar o cruzamento das informações obtidas. A sobreposição das diversas layers geradas no software ArcGIS 10, com o cruzamento dos índices calculados como preconizado pelo Método COP (Figura 1), viabilizou a geração do produto final – Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação da área (Figura 6).

RESULTADOS

A análise da Tabela 2 permite constatar que os solos da área apresentam valores médios de granulometria caracterizados por partículas tamanho silte

(60,82%), areia (22,26%) e argila (16,92%). Dessa forma, os solos analisados são caracterizados texturalmente como: silto-arenosos: 41,18%; silto-argilosos: 35,29% e siltosos: 23,53%.

Tabela 2: Resultados das análises granulométricas de amostras de solos coletados na área, de acordo com Nossa (2011).

AMOS TRAS	GRANULOMETRIA (ABNT - NBR 7181/84) (%)											
	PEDREGULHO			AREIA			SILTE			ARGILA		
	G	M	F	G	M	F	G	M	F			
	60	20	6	2,0	0,6	0,2	0,06			0,002	0	
COORDENADAS UTM	AREIA (%)				FINOS (%)							
	AREIA MÉDIA	AREIA FINA	AREIA MUITO FINA	AREIA TOTAL	SILTE MUITO GROSSO	SILTE GROSSO	SILTE MÉDIO	SILTE FINO	SILTE MUITO FINO	SILTE TOTAL	ARGILA	
S-01	191961/8736602	3,4	7,1	4,9	15,4	2,7	3,8	10,5	19,4	20,2	56,6	28,0
S-02	190969/8738176	1,6	5,7	13,6	20,9	10,7	5,2	8,0	14,3	17,8	56,0	23,2
S-03	195003/8735610	1,4	10,9	26,3	38,6	21,1	13,3	8,8	6,9	7,2	57,3	3,9
S-04	191326/8737898	7,8	19,6	19,7	47,1	13,0	11,5	9,4	7,4	7,1	48,4	4,5
S-05	195334/8740570	4,6	8,1	6,0	18,7	3,0	2,7	9,0	16,9	16,7	48,3	33,0
S-06	187643/8739033	2,6	8,8	17,5	28,9	13,3	9,6	10,2	11,8	12,3	57,2	13,8
S-07	189937/8740531	1,2	6,0	17,6	24,8	17,4	12,9	12,0	12,3	13,1	67,7	7,4
S-08	188078/8744721	0,5	6,0	18,9	25,4	21,8	16,8	11,4	9,2	9,9	69,1	5,3
S-09	192477/8746946	0,0	1,6	0,0	1,6	0,0	1,3	8,3	20,0	21,8	51,4	46,9
S-10	194710/8750869	0,4	3,9	17,8	22,1	23,2	17,3	12,1	9,7	10,0	72,3	5,8
S-11	191260/8737581	0,6	5,0	15,0	20,6	21,0	17,2	12,2	10,5	11,8	72,7	6,7
S-12	189089/8750621	0,1	2,7	4,5	7,3	2,6	2,3	7,9	21,1	25,8	59,7	33,1
S-13	188468/8751211	1,4	5,1	9,4	15,9	12,0	16,4	19,2	15,0	11,5	74,1	10,0
S-14	185984/8749068	1,5	7,7	17,9	27,1	14,0	10,0	10,6	12,5	13,9	61,0	12,0
S-15	183872/8749347	0,4	4,2	15,9	20,5	20,5	17,6	12,9	10,6	11,4	73,0	6,5
S-16	184369/8747888	0,3	1,7	2,7	4,7	3,7	6,9	11,6	15,4	15,2	52,8	42,5
S-17	190409/8749943	1,9	11,4	25,5	38,8	18,7	11,0	8,7	8,3	9,4	56,1	5,1

A análise do Mapa Hidrogeológico permite constatar que as direções preferenciais de fluxos subsuperficiais obtidas na área ocorrem preferencialmente

no sentido (E-W), concordantes com as direções preferenciais de fluxo obtidas por Guerra (1986), para esse trecho da Bacia de Irecê.

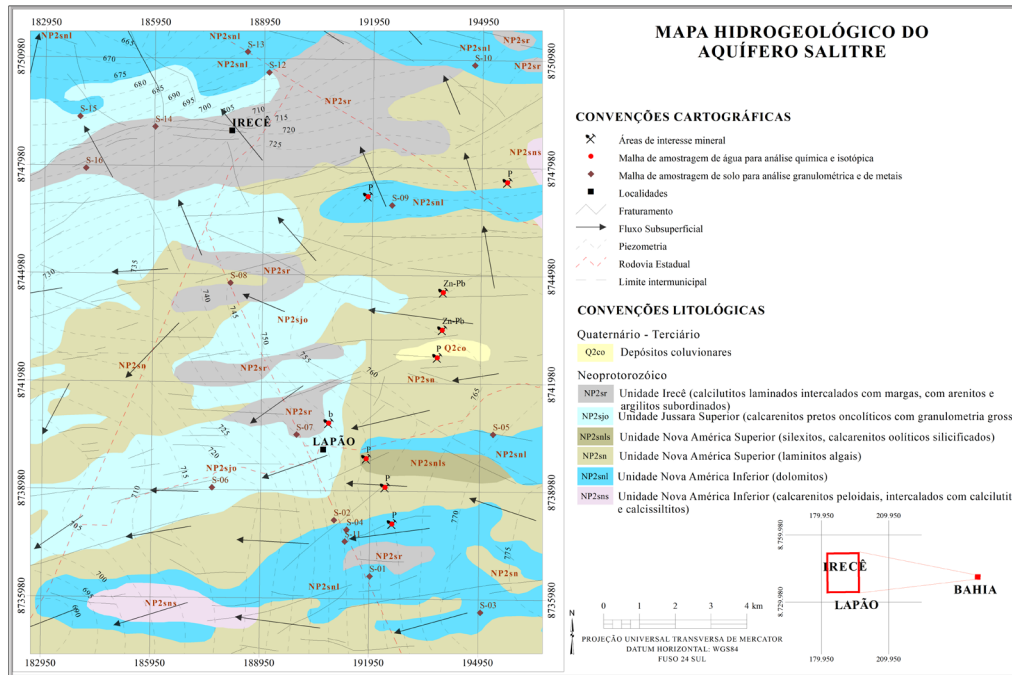


Figura 2: Mapa Hidrogeológico.

A área é bastante carstificada, como constatado no Mapa de Dolinas e Fraturas (Figura 3), com uma concentração muito grande de dolinas, perfazendo um total de 177 dolinas mapeadas, com uma área total de cerca de 11,73km², com tamanhos que variam de dezenas a centenas de metros, constituindo um total

de 4,7% da área de pesquisa. Essas feições cársticas ocorrem alinhadas em grande parte com as principais direções de fraturas da área, desenvolvendo-se ao longo dessas zonas de fraqueza, que são dutos preferenciais por onde a água infiltra e percola nas rochas, recarregando os aquíferos.

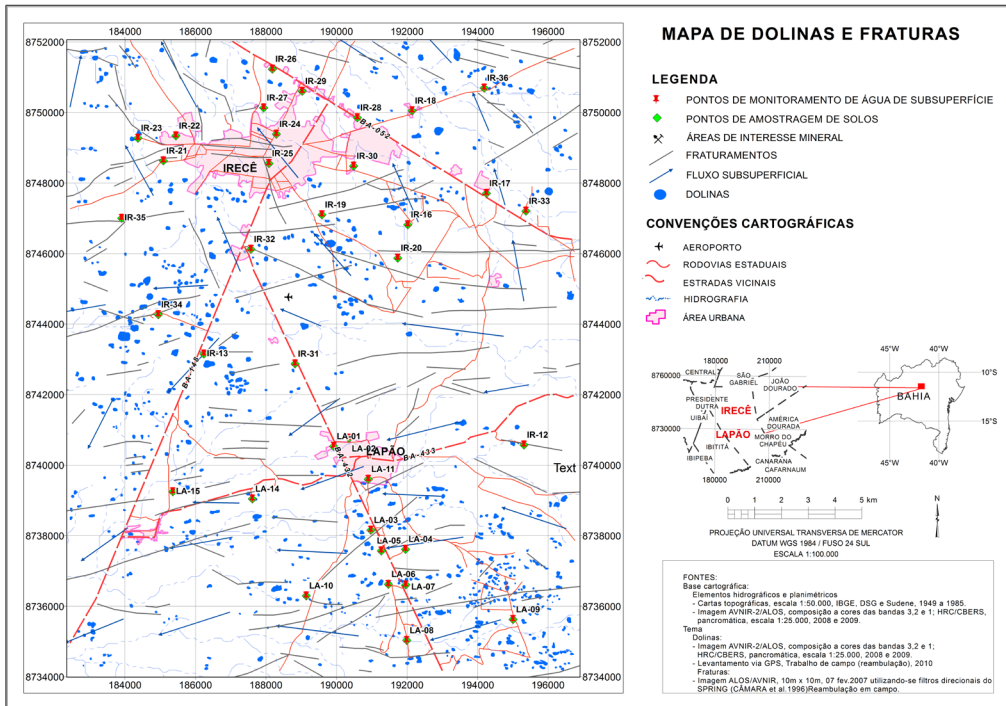


Figura 3: Mapa de Dolinas e Fraturas

A elaboração do Mapa de Declividade (Figura 4) permitiu constatar que a área possui declividades bastante suaves, predominando as classes com declividades inferiores a 8% que perfazem, aproximadamente, 94% da área, caracterizando o domínio geomorfológico denominado de Chapada de Irecê,

com topografia plana a suavemente ondulada e elevações suaves. As declividades intermediárias são subdivididas em classes que variam de 8% a 20% e constituem 5,4% da área. O equivalente a aproximadamente 0,6% do restante da área, é constituída por declividades superiores a 20%.

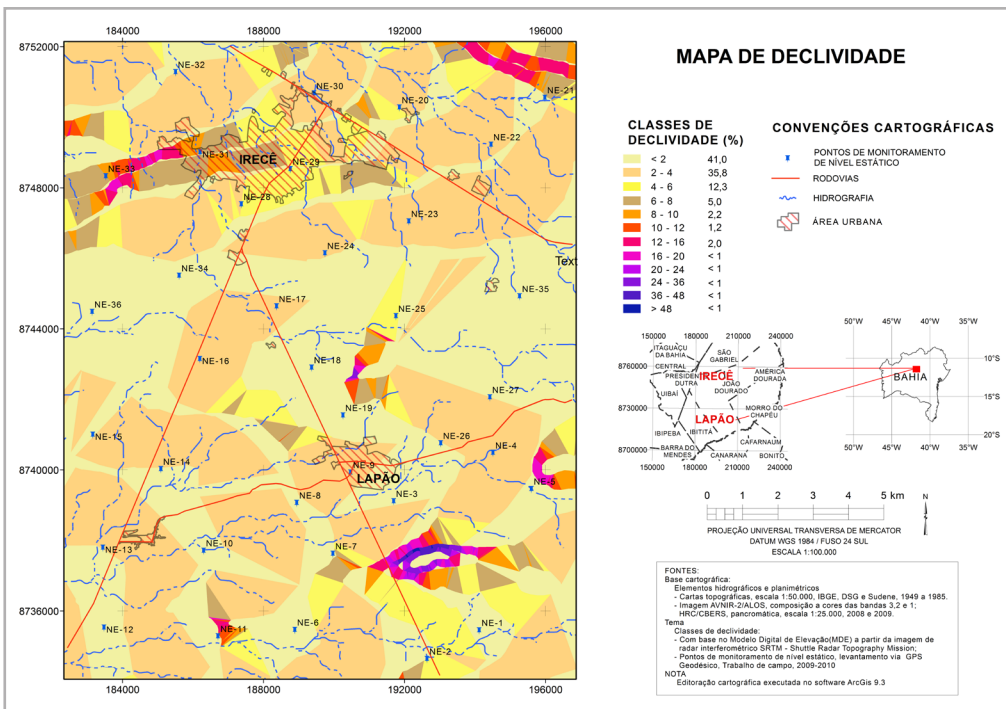


Figura 4: Mapa de Declividade

O Mapa de Uso e Ocupação dos Solos (Figura 5) demonstra que a cidade de Irecê apresenta vetores de crescimento preferenciais no setor sul, em direção à BA-432, no sentido da cidade de Lapão, nos setores N/NE, em direção ao povoado de Meia Hora e a N/NW da área, em direção à cidade de Xique-Xique. Por sua vez, a cidade não apresenta vetores de crescimento nos setores SW, em função da presença do lixão e SE, devido à área da mineração Galvani que atua na prospecção de fosfato. A cidade de Lapão apresenta vetores de crescimento preferenciais na direção E-W ao longo da BA-433 e ao norte, ao longo da BA-432, em direção à cidade de Irecê, no setor sul da cidade o

vetor de crescimento é inibido em função da presença do lixão.

As classes de uso e ocupação dos solos foram subdivididas da seguinte maneira: Agropecuária (75,70%), Cobertura Vegetal Nativa (17,41%), Área Urbanizada (4,36%), Áreas da Mineração Galvani (2,48%) e Lixões (0,05%), gerando o Mapa de Uso e Ocupação dos Solos. Analisando-se a distribuição dessas classes na área, pode-se constatar que predominam as atividades de agropecuária, sobretudo as atividades agrícolas, que são as grandes responsáveis pela receita dos municípios de Irecê e Lapão.

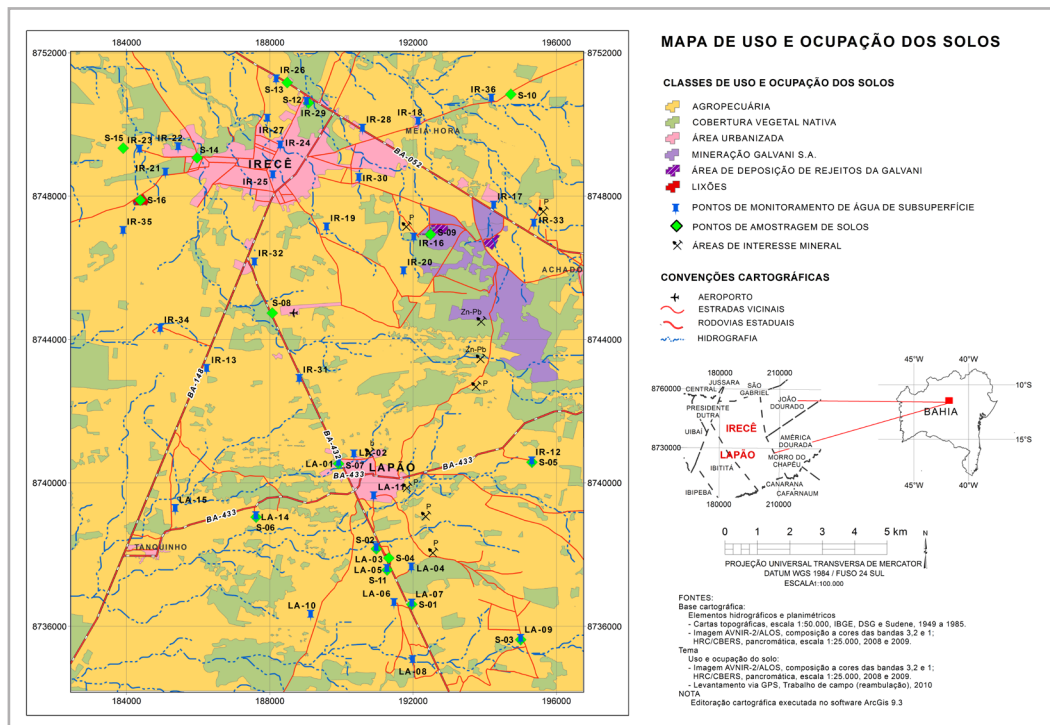


Figura 5: Mapa de Uso e Ocupação dos Solos

O Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação da área foi elaborado por Nossa (2011), mediante a aplicação do Método COP (Tabela 1), desenvolvido por Vias et al. (2002, 2006). A análise desse mapa permite constatar a delimitação de 3 classes de vulnerabilidade intrínsecas na área: Moderada (53%), Baixa (40%) e Muito Alta (7%), obtidas com base na análise dos atributos discriminados pelo Método COP e na relação entre os mapas temáticos gerados: Mapa Hidrogeológico, Mapa de Dolinas e Fraturas, Mapa de Declividade e Mapa de Uso e Ocupação dos Solos.

A análise dos atributos relacionados para a elaboração do Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação (Figura 6), através da aplicação do Método COP, permitiu realizar uma avaliação sobre a importância dos parâmetros envolvidos no cálculo das classes de vulnerabilidade. Dessa forma, foi possível

constatar que os fatores que mais influenciaram nos índices COP gerados na área foram: o fator “C”, nas áreas de influência das feições cársticas (dolinas e sumidouros), constituindo a delimitação das classes de vulnerabilidade Muito Alta e Moderada, devido à intensidade dos processos de carstificação e à presença de fraturas e o fator “O”, atuante em toda a área, inclusive nas zonas em que não ocorrem processos de carstificação, delimitadas como classe de vulnerabilidade Baixa. O fator “P” é constante, em função do tamanho da área, não contribuindo de forma direta para o zoneamento de vulnerabilidade do aquífero Salitre.

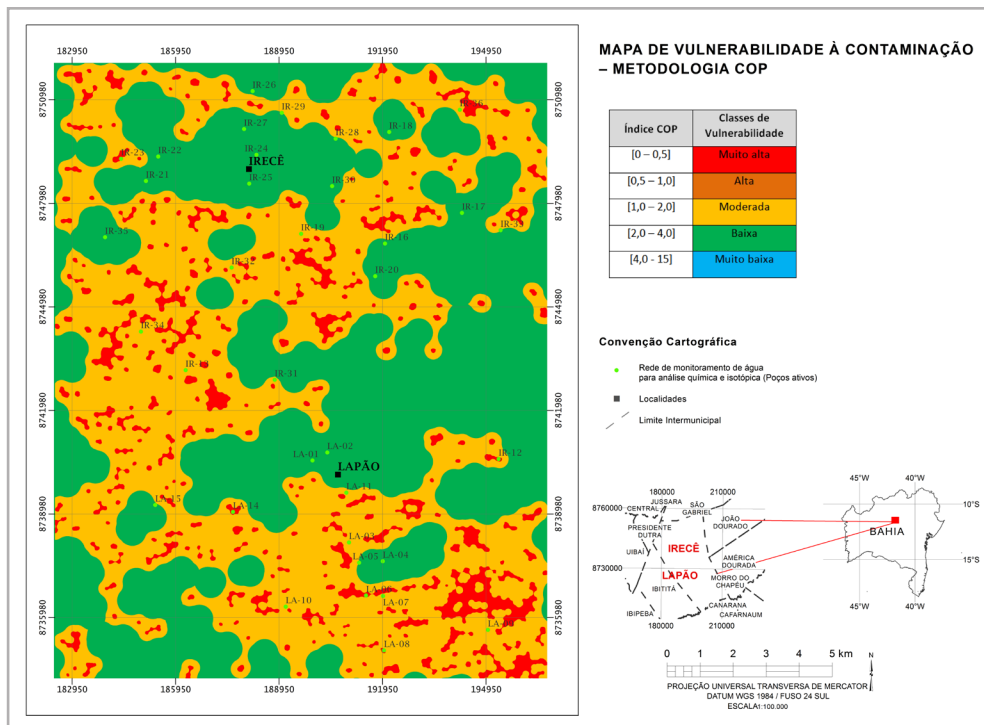


Figura 6: Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação - Método COP (Nossa, 2011).

CONCLUSÃO

A análise do Mapa Hidrogeológico permite constatar que as direções preferenciais de fluxos subsuperficiais obtidas na área ocorrem preferencialmente no sentido (E-W).

O Mapa de Dolinas e Fraturas demonstra que as áreas preferenciais de recarga compreendidas pelas feições cársticas que formam as dolinas e sumidouros, juntamente com os locais de intenso fraturamento, são zonas propícias a um maior aporte hídrico e, portanto, devem ser áreas preservadas pelo poder público municipal, de forma a viabilizar uma gestão racional dos recursos hídricos desses municípios.

O Mapa de Declividade gerado demonstra que a topografia plana a suavemente ondulada, com classes de declividade menores que 8%, que equivalem a 94% do total da área, propicia o predomínio de processos de infiltração sobre os processos de escoamento superficial, contribuindo com um maior aporte hídrico para o aquífero Salitre que, no entanto, permanece com um déficit hídrico, em função das precipitações escassas e irregulares que caracterizam o clima semiárido na região. A agricultura irrigada efetuada através da utilização de sistemas de irrigação com captação de água em poços tubulares se constitui em uma alternativa de produção para viabilizar melhorias socioeconômicas, uma vez que apresenta um menor risco em relação à escassez e irregularidade de chuvas da região.

O Mapa de Uso e Ocupação dos Solos pode

ser utilizado pelos gestores municipais para compatibilizar os vetores de crescimento das cidades de Irecê e Lapão com as atividades desenvolvidas na área.

A análise do Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação permitiu a delimitação de 3 classes de vulnerabilidade intrínsecas na área: Moderada (53%), Baixa (40%) e Muito Alta (7%), obtidas com base na análise dos atributos discriminados pelo Método COP e nos mapas temáticos gerados: Mapa Hidrogeológico, Mapa de Dolinas e Fraturas, Mapa de Declividade e Mapa de Uso e Ocupação dos Solos.

A delimitação das classes de vulnerabilidade na área dependeu fundamentalmente do fator “C”, nas áreas de ocorrência de dolinas e sumidouros, aliado ao sistema de fraturamentos e do fator “O” que apresenta pequenas variações, uma vez que a capacidade de proteção das camadas que compreendem a zona não saturada é baixa em toda a área, variando em intervalos de 1,0m a 3,0m, quando presentes. O fator “P” não contribui diretamente com a delimitação de classes de vulnerabilidade, uma vez que é constante em função do pequeno tamanho da área e da presença de apenas uma estação climatológica, localizada na cidade de Irecê.

O Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca à Contaminação elaborado para a área, pode ser utilizado para o planejamento, gestão hídrica e territorial dos municípios de Irecê e Lapão, uma vez que delimita as áreas mais vulneráveis à contaminação, como um indicativo de que devem ser áreas protegidas pelo poder público municipal, de forma a viabilizar programas de gestão

comprometidos com a preservação do meio ambiente.

A utilização da cartografia de vulnerabilidade específica para cada contexto hidrogeológico é extremamente relevante, principalmente como um método de prevenção de potenciais fontes contaminantes e de proteção das águas subterrâneas frente a esses processos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos especialmente à CPRM - Serviço Geológico do Brasil, pelo apoio para a realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINET, M. & MARGAT, J. 1970. Cartographie de la vulnérabilité a la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull BRGM2. 3(4):13-22.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEER, J.; PETTY, J. & HACKET, G. 1987. DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US Environmental Protection Agency. 455 p.
- ANDREOB., VÍAS, J. M.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I. & JIMENÉZ, P. 2002. Ensayo metodológico para la protección de águas subterrâneas em aquíferos carbonatados. Aplicación al sistema de Torremolinos. Jornadas sob presente y futuro del água subterrânea em España y La Directiva Marco Europea. Zaragoza (Spain). IAH-Spanish Chapter. 147-153p.
- ANDREO, B.; GOLDSCHIEDER, N.; VADILLO, I.; VÍAS, J. M.; NEUKUM, C.; SINREICH, M.; JIMÉNEZ, P.; BRECHENMACHER, J.; CARRASCO, F.; HÖTZL, H.; PERLES, M. J. & ZWAHLEN, F. 2006. Karst groundwater protection: first application of a Pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain). *Science of the Total Environment*. 357(1-3): 54-73p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1984. Solo: análise granulométrica. NBR 7181/84, Rio de Janeiro. 13p.
- BACHMAT, Y. & COLLINS, M. 1987. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. En: Van Duijvenbooden, W. y Van Waegeningh. H.G. (eds.), *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. 297-307p.
- BALDI, E.; GUASTALDI, E. & ROSSETO, R. 2009. Evaluation of intrinsic groundwater vulnerability to pollution: COP method for pilot área of Carrara hydrogeological system (Northern Tuscany, Italy). *General Assembly 2009. European Geosciences Union, Vienna*. Vol. 11, EGU2009-10405-2.
- DALY, D.; DASSARGUES, A.; DREW, D.; DUNNE, S.; GOLDSCHIEDER, N.; NEALE, N.; POPESCU, C. Y. & ZWAHLEN, F. 2002. Main concepts of the European Approach for (karst) groundwater vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal*. 10(2): 340-345p.
- DOERFLIGER, N. & ZWAHLEN, F. 1997. EPIK: a new method for outlining of protection áreas in karst environment. In Gunai & Jonshon (ed.) *Int. Symp. on Karst Waters and Environment. Impacts*. Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam. 117-123p.
- EMBRAPA. 2006. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro. 2ed.: EMBRAPA-SPI.
- FOSTER, S. S. D. & HIRATA, R. C. A. 1988. Groundwater pollution risk evaluation: a survey manual using available data. 2ed. LIMA: Pan American Sanitary Engineering and Environmental Science Center. (CEPIS/PAHO/WHO). 91p.
- GOLDSCHIEDER, N. 2002. Hydrogeology and vulnerability of karst systems: examples from the Northern Alps and Swabian. Alb. Ph.D. Thesis, *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Karlsruhe*. 236p.
- GUERRA, A. M. 1986. Processos de carstificação e hidrogeologia do Grupo Bambuí na região de Irecê-Bahia. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências. USP. 126p.
- HIRATA, R. C. A. & FERNANDES, A. 2005. Vulnerabilidad de aquíferos a la contaminación antrópica. In: Diaz-Delgado, C.; Esteller, M. V.; Lopez-Vera, F. (Org.). *Recursos hídricos - Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica*. 1 ed. Uruguay: Piriguazú Ediciones. V.1, 443-454p.
- IBGE. 2007. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Imagem AVNIR-2/ ALOS. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/alos/>. Acesso em: 10.01.2009.
- LE GRAND, H. 1964. System for evaluating contamination potential to some wast sites. *American Water Work Association Journal*. V. 56(8):959-974p.
- NOSSA, T. C. B. 2011. Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre-Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. 226p.
- PEDREIRA, A. J.; ROCHA, A. J. D.; COSTA, I. V. G. da; MORAIS FILHO, J. C. 1987. Projeto Bacia de Irecê-II: relatório final. Salvador, CPRM.
- RAVBAR, N. 2007. Vulnerability and risk mapping for the protection of karst waters in Slovenia:

- application to the catchment of the Podstenjšek springs. PhD Thesis, University of Nova Gorica, Slovenia.
- TALTASSE, P. 1972. Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP). Universidade de São Paulo (IG.). Publ. Avulsa.
- VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I. & JIMENEZ, P. 2004. The COP method. In: Zwalen, F. (ed.). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, EUR20912. Brussels7 European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development. 163-171p.
- VÍAS, J. M.; ANDREO, B.; PERLES, M. J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I. & JIMÉNEZ, P. 2006. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. *Hydrogeology Journal*.
- VRBA, J. & SOBLSEK, P. 1988. Groundwater monitoring. En *Geology and Environment International Manual* in three volumes. UNESCO. UNEP.
- VRBA, J. & ZAPOROZEC, A. 1994. Classification and review of groundwater vulnerability maps. En Vrba, J. & Zaporozec, A. (eds.). *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International contributions to hydrogeology. (16):21-30p.
- ZWAHLEN, F. 2004. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Informe Final de la Acción COST 620, eur. 20912, European Commission, Directorate General for Research. 297p.

Submetido: Dezembro/2014
Revisado: Novembro /2015
Aceito: Novembro/2015