



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS IBAMA

DIRETORIA DE ECOSISTEMAS e DIREC

CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS e CECAV

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD



PRODUTO 08

TERMO DE REFERÊNCIA Nº 119701

ANDRÉ LUIZ DE MOURA CADAMURO
CONSULTOR TÉCNICO, GEÓLOGO - CECAV/IBAMA
CONTRATO Nº 2006/000372

**MAPA DE VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO À
CONTAMINAÇÃO NA REGIÃO DAS GRUTAS DA BACIA DO SÃO
FRANCISCO.**

Dezembro de 2007



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

MAPA DE VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO À CONTAMINAÇÃO NA REGIÃO DAS GRUTAS DA BACIA DO SÃO FRANCISCO.

1. INTRODUÇÃO

O ambiente hidrogeológico cárstico possui um equilíbrio naturalmente sensível no que tange à qualidade das águas subterrâneas, condições de recarga e descarga do aquífero e nas condições de circulação hídrica do meio. Ademais, os carstes são, em geral, ambientes-alvos de atividades mineradoras, agrícolas, industriais, e mais comumente àquelas relacionadas à ocupação urbana e/ou rural. Essas atividades são potencialmente geradoras de cargas contaminantes diversas, as quais somadas à sensibilidade natural do carste podem vir a acarretar modificações físicas e químicas das águas subterrâneas e até mesmo das superficiais.

Essa "sensibilidade" do ambiente cárstico pode ser referida em termos hidrogeológicos como *vulnerabilidade do aquífero à contaminação*. Um termo atual e amplamente utilizado no meio científico hidrogeológico considerado como "o conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero da superfície do solo, o que determina sua susceptibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície" (Foster, 1987 *apud* Foster *et al.* 2006).

O mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação tem sido uma prática muito utilizada pelos órgãos gestores dos recursos hídricos subterrâneos como ferramenta para as tomadas de decisões em termos de gestão dos aquíferos e do uso do solo. Inúmeros levantamentos sobre a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação têm sido desenvolvidos no Brasil Barboza *et al.* (2007); Santos *et al.* (2006), Martinez & Silva (2004); Hirata & Ferreira (2001); Hirata (1994), e no mundo.

Os métodos para avaliação da vulnerabilidade são diversos, sendo que os mais aplicados e difundidos no Brasil são o GOD e o DRASTIC, que têm nas suas siglas as iniciais dos parâmetros hidrogeológicos necessários para compor o índice de vulnerabilidade de uma área em pesquisa.

As características hidrogeológicas das áreas investigadas nesses estudos também são bastante diversificadas. Atualmente existem estudos concluídos em aquíferos porosos,



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

fraturados e cársticos. Estudo recente desenvolvido em conjunto entre o IBAMA e a CPRM, resultou no mapa de vulnerabilidade, na escala de 1:50.000, dos aquíferos da APA carste de Lagoa Santa-MG, por exemplo.

Na Zona Cárstica de Pains, faz-se igualmente necessário a realização de um estudo dessa natureza, que caracterize a título de reconhecimento ou enfoque específico sobre a vulnerabilidade do aquífero cárstico da região, diante da sua importância para o sistema espeleológico e devido as pressões antrópicas impostas àquela região.

Com esse objetivo, este produto apresenta um estudo sobre a vulnerabilidade do aquífero cárstico na Zona Cárstica de Pains, mais especificamente dentro *Área de Influência Mínima do Sistema Espeleológico da Gruta do Éden*, já anteriormente delimitada, em consonância com a sua importância hidroespeleológica local. O método de avaliação da vulnerabilidade utilizado nesse estudo foi o GOD (Grau de confinamento da água subterrânea; Ocorrência de estratos de cobertura; Distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado), que requer informações hidrogeológicas normalmente disponíveis ou facilmente adquiridas.

2. FUNDAMENTOS CONCEITUAIS E METODOLOGIA

O conceito de vulnerabilidade de aquíferos foi inicialmente utilizado por Le Grand (1964), nos EUA, e Albinet & Margat (1970), na França, e mais amplamente nos anos 1980 por vários outros autores (Hirata, 2001). Desde então, esse conceito tem sido usado para expressar:

- a) Características intrínsecas que determinam a sensibilidade de um aquífero ser adversamente afetado por uma carga contaminante antropicamente imposta;
- b) Classificação dos aquíferos baseada na importância do recurso hídrico que é ou será utilizado no presente e no futuro incluindo a possibilidade de ser substituído por outro recurso; e
- c) Classificação baseada na importância do aquífero em manter áreas ecológicas importantes.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Do ponto de vista técnico-científico, a primeira definição é a mais amplamente utilizada. Segundo Foster & Hirata (1988), a vulnerabilidade de um aquífero pode ser entendida em função de:

- a) Acessibilidade hidráulica da zona não saturada à penetração de contaminantes (advecção de contaminantes); e
- b) Capacidade de atenuação da camada que cobre a zona saturada, resultado da retenção ou reação físico-química de contaminantes (dispersão, retardação e degradação).

Nesse sentido, inúmeros métodos de determinação de índices de vulnerabilidade de aquíferos à contaminação estão em uso atualmente (Tabela 1), os quais utilizam-se de parâmetros hidrogeológicos diversos para a composição de um índice de vulnerabilidade de um determinado aquífero, que em seguida são enquadrados em classes de vulnerabilidade.

As classes de vulnerabilidade normalmente variam de extrema à negligível, mas variam a depender do método utilizado. Uma vez enquadrado nas classes de vulnerabilidade, gera-se um mapa de vulnerabilidade, o qual busca integrar os índices de vulnerabilidade em diversos pontos de uma área, em uma escala de trabalho que contemple os objetivos do levantamento.

O avanço da cartografia digital e do SIG (Sistema de Informações Geográficas) têm em muito contribuído para a praticidade da geração dos mapas de vulnerabilidade. A difusão de dados hidrogeológicos em sistemas de informações e a cooperação entre os órgãos gestores de meio ambiente e recursos hídricos têm igualmente contribuído para esse processo, no sentido de difusão e compartilhamento de informações hidrogeológicas, embora ainda se precise otimizar esses processos.

Tabela 1 - Principais métodos para a determinação da vulnerabilidade e riscos de contaminação de aquíferos. Fonte: Hirata (1994).

MÉTODO	TIPO DE AVALIAÇÃO	FATORES	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
SURFACE IMPOUNDMENT ASSESSMENT	Sistemas de deposição de águas servidas	-zona não saturada -importância do recurso -qualidade das substâncias -periculosidade do material	Le Grand (1964)
LANDFILL SITE RATING (Método Le Grand-Brown)	Aterros sanitários novos e em operação	-distância aterro/poços -profundidade d'água -gradiente do aquífero	Le Grand (1964)



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

SITE RANKING SYSTEM	Disposição de produtos químicos novos e em operação	-solo, características hidráulicas, sorção e tamponamento químico -hidrodinâmica do aquífero -ar -população próxima	Hargerty <i>et al.</i> (1973)
POLUIÇÃO DOS LENÇÓIS AQUÍFEROS	Vulnerabilidade geral	-geologia (litologia e estrutura)	Taltasse (1972)
WASTE-SOIL INTERACTION MATRIX	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	-efeitos na saúde -características do produto químico -comportamento do produto -capacidade do solo (atenuação) -hidrogeologia -características do local	Philips <i>et al.</i> (1977)
SITE RATING METHODOLOGY	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	-receptor-população/uso da água/uso local/degradação ambiental -caminhos-nível e tipo de contaminação; profundidade da água; pluviometria; permeabilidade do solo -características dos resíduos-toxicidade, persistência prática manejo/operação	Kulfs <i>et al.</i> (1980)
TPE	Áreas de risco de contaminação	-velocidade da água subterrânea -porcentagem de argila da zona não saturada -atividade potencial /contaminante -exploração dos aquíferos	Silva <i>et al.</i> (1980)
HAZARD RANKING SYSTEM	Áreas prioritárias para ação de limpeza do aquífero	-migração-característica do meio e resíduo: quantidade produto; proximidade da população -explosão e fogo -contato direto	Caldwell <i>et al.</i> (1981)
MAPA DE VULNERABILIDADE	Vulnerabilidade universal	-características litológicas -áreas de recarga e descarga	Duarte (1980)
BRINE DISPOSAL METHODOLOGY	Águas de formação de campos de petróleo e gás	-método de disposição -volume -geologia -densidade de poços -proximidade de poços de água	Western Michigan University (1981)
PESTICIDE INDEX	Pesticidas de uso normal	-características físico-químicas do pesticida -climatologia -perfil do solo -tipo de cultura	Rao <i>et al.</i> (1985)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral	-D profundidade da água -R recarga	Aller <i>et al.</i> (1987)



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

		-A meio aquífero -S solo - T topografia - I impacto no aquífero -C condutividade hidráulica	
GOD	Vulnerabilidade geral	-G tipo de aquífero -O litologia da zona vadosa - D profundidade da água	Foster & Hirata (1993)
GROUNDWATER VULNERABILITY MAP FOR NITRATE	Vulnerabilidade para nitrato da atividade agrícola	-tipo de solo -características hidrogeológicas e litológicas do aquífero	Palmer (1988)
POTENTIAL WASTE SITES (PWDS)	Disposição de resíduos sólidos	-vulnerabilidade -confinamento do aquífero -proximidade de fontes -tipo e quantidade de poluentes	BGS (Sem data)
RISCO POR SISTEMAS DE SANEAMENTO <i>IN</i> <i>SITU</i>	Avaliar áreas de maior risco por sistemas de saneamento <i>in situ</i>	-vulnerabilidade (GOD) -densidade da população -análise de indicadores físico- químicos (CE)	Ferreira & Hirata (1993)

Neste trabalho optou-se por utilizar o método GOD proposto por Foster & Hirata (1988), pela sua facilidade de obtenção de informações necessárias para obtenção dos índices de vulnerabilidade e pela sua ampla difusão e utilização no Brasil.

O método GOD de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação foi amplamente testado na América Latina e Caribe durante a década de 1990, onde para determinar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, são considerados dois fatores básicos (Foster *et al.*, 2006):

- O nível de acessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero
 - A capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da porção saturada do aquífero
- Segundo Foster (1987); Foster & Hirata (1988) *apud* Foster *et al.* 2006, para simplificar, índice de vulnerabilidade GOD caracteriza a vulnerabilidade do aquífero à contaminação tendo em conta os seguintes parâmetros:
- O confinamento hidráulico da água subterrânea no aquífero em questão;
 - Os estratos de cobertura (zona vadosa ou camada confinante), em termos da característica hidrogeológica e do grau de consolidação que determinam sua capacidade de atenuação do contaminante;
 - A profundidade até o lençol freático ou até o teto do aquífero confinado.

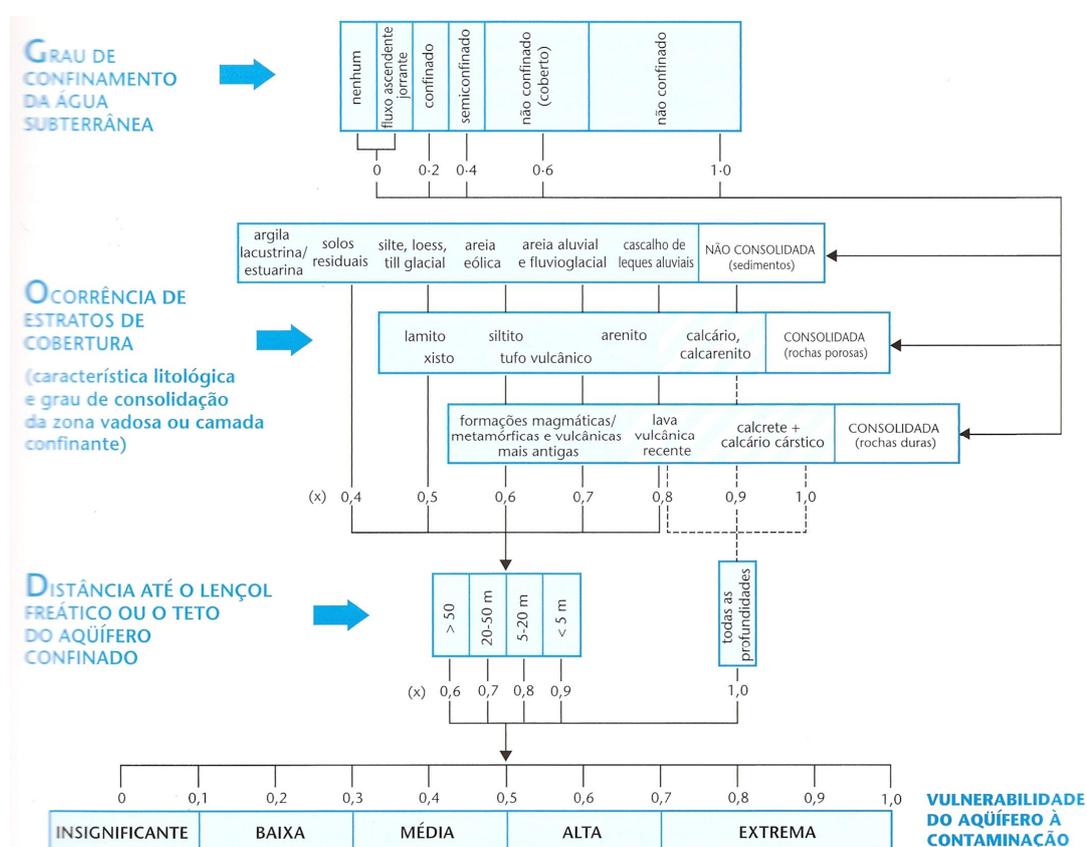


MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

A determinação da vulnerabilidade no GOD é composta pela integração de três índices (Tabela 2):

- 1º. Grau de confinamento da água subterrânea (escala de 0,0 a 1,0);
- 2º. Ocorrência de estratos de cobertura (escala de 0,4 a 1,0)
- 3º. Distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado (escala de 0,6 a 1,0).

Tabela 2 é o Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação. Fonte: Foster et al. (2006).



As classes de vulnerabilidade do GOD variam de insignificante a extrema (Tabela 3), e representam variados cenários da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

Tabela 3 ó Classes de vulnerabilidade do aquífero. Modificado de Foster et al. (2006).

Classe de vulnerabilidade	Índice	Descrição
Insignificante	0,0 ó 0,1	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea (percolação).
Baixa	0,1 ó 0,3	Vulnerável somente a contaminantes conservadores, em longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados.
Média ou Moderada	0,3 ó 0,5	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados.
Alta	0,5 ó 0,7	Vulnerável a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvido ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação.
Extrema	0,7 ó 1,0	Vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.

Segundo Hirata (2001), a integração de mapas de vulnerabilidade com perímetros de proteção de poços e identificação de fontes de contaminação (carga contaminante gerada por atividades potencialmente contaminantes) são instrumentos utilizados em programas de proteção das águas subterrâneas de vários países. A vulnerabilidade de aquíferos poderá ser utilizada para priorizar a ação do órgão gestor, buscando aquelas atividades que oferecem maiores perigos de contaminação (interação entre vulnerabilidade e carga contaminante potencial) ou restringir ou permitir a instalação de uma atividade segundo a vulnerabilidade do aquífero.

Na área de pesquisa, Zona Cárstica de Pains, as informações necessárias para o estabelecimento do índice de vulnerabilidade GOD foi obtido por meio da coleta de dados de cisternas, em campo, e de poços tubulares profundos, estes fornecidos pelo SAAE (Serviço de Autônomo de Água e Esgoto).

3. RESULTADOS

O índice de vulnerabilidade à contaminação de aquífero GOD foi determinado, na Zona Cárstica de Pains, para o aquífero cárstico e físsuro-cárstico, onde neste último foram incluído os aquíferos referentes aos depósitos aluvionares, detrito-lateríticos e aos



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

latossolos que foram denominados de Sistema Aquífero Granular no Produto 2. Essa opção justifica-se pelo fato de que na ocasião de reconhecimento preliminar e a nível regional a separação é plausível do ponto de vista geológico e geomorfológico, não ocorrendo o mesmo quando a observação passa a nível de detalhe, como no caso desse estudo de vulnerabilidade.

A partir das informações hidrogeológicas coletadas foram obtidos os índices individuais de cada parâmetro do método GOD, posteriormente agrupados para comporem o índice de vulnerabilidade à contaminação final de cada ponto dos aquíferos, sendo a seguir interpolados para a geração dos mapas de vulnerabilidade para ambos aquíferos.

A vulnerabilidade natural à contaminação determinada para os aquíferos na Zona Cárstica de Pains foi limitada à Área de influência mínima do Sistema Espeleológico Éden, esta já anteriormente determinada no Produto 3.

3.1 VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO FÍSSURO-CÁRSTICO

A determinação do índice de vulnerabilidade GOD do aquífero físsuro-cárstico da Zona Cárstica de Pains foi feita com base em informações normalmente coletadas de cisternas em campo. Esses pontos estão distribuídos ao longo da ocorrência das rochas do Subgrupo Paraopeba, dentro dos limites da Área de Influência Mínima do Sistema espeleológico da gruta Éden. Apenas um ponto sobre a área de ocorrência das rochas da Formação Sete lagoas que compõe o Sistema Aquífero Cárstico. Nesse ambiente o Sistema Aquífero Físsuro-Cárstico ocorre em algumas situações sobreposto ao Cárstico.

3.1.1 Descrição dos parâmetros do índice de vulnerabilidade GOD

A composição do índice final de vulnerabilidade à contaminação do aquífero físsuro-cárstico GOD consistiu na determinação individual de valores para cada parâmetro:

- Parâmetro **G** - grau de confinamento da água subterrânea (escala de 0,0 a 1,0);

O grau de confinamento da água subterrânea no aquífero físsuro-cárstico nos pontos observados é, segundo a tabela 2, *não-confinado (coberto)* e *não-confinado*, com



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

índices que variam de 0,6 a 1,0. Essa característica impute ao ambiente aquífero uma relativa "desproteção" em relação a possíveis lançamentos de efluentes na superfície do solo. Entretanto, essa desproteção só se conclui com a totalização dos demais parâmetros do método.

- Parâmetro **O** - ocorrência de estratos de cobertura (escala de 0,4 a 1,0);

O tipo de estrato de cobertura observado em todos os pontos de cisterna para o sistema aquífero físsuro-cárstico foram *solos residuais*. Neste caso a pontuação do índice **O** para todos os pontos foi de 0,4, que representa também um índice de relativa proteção ao aquífero em estudo.

A variação da espessura dos solos sobrepostos ao aquífero e a composição mineralógica e orgânica também dos mesmos também ditarão sua maior ou menor eficiência na atenuação dos contaminantes, porventura, lançados na superfície.

- Parâmetro **D** - distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado (escala de 0,6 a 1,0);

A distância do solo até a superfície freática foi um dos fatores mais decisivos para constituir o índice de vulnerabilidade GOD, uma vez que sua variação foi ampla e os valores baixos. Valores da ordem de 1 a 10 metros foram observados nos níveis d'água das cisternas em campo.

Os índices do parâmetro **D** obtidos foram de 0,9 para três pontos observados, sendo os níveis com valores da ordem de 1 metro de profundidade. No que tange aos demais (sete pontos) o índice obtido foi de 0,8, para níveis com variações de cerca de 5 a 10 metros de profundidade.

➤ Índice **GOD**

A composição do índice de vulnerabilidade à contaminação GOD foi então determinado pelo produto dos parâmetros **G**, **O** e **D**, descritos acima. Os índices obtidos foram predominantemente de baixa vulnerabilidade (valor médio 0,213), seguidos de dois pontos de alta vulnerabilidade (valor médio 0,504) e apenas um ponto com vulnerabilidade média (0,360).



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

➤ Mapa de Vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Físsuro-Cárstico

O mapa vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Físsuro-Cárstico (Figura 1) apresenta a interpolação feita entre os pontos onde foram determinados os índices de vulnerabilidade GOD.

A *vulnerabilidade baixa* à contaminação predomina na maioria da área estudada. Nessa área o aquífero em análise está protegido por solos e encontra-se normalmente na forma não-confinado (coberto), e os níveis d'água variáveis. A vulnerabilidade baixa, segundo o método GOD indica que o aquífero é *vulnerável somente a contaminantes conservadores, em longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados*.

Nessa situação podemos apontar como contaminantes conservadores na região mapeada os compostos nitrogenados, produtos comuns de fossas negras, sépticas ou redes de esgotos, que são lançados no rio São Miguel sem tratamento ou dispostos em fossas no solo (saneamento *in situ*), sendo este último caso mais prejudicial ao aquífero pela possibilidade desses efluentes atingirem a zona saturada do mesmo.

Os efluentes domésticos são compostos principalmente por excrementos humanos e água servida. Esses efluentes têm altas concentrações de carbono e nitrogênio na forma reduzida, apresentando também duas classes de contaminantes: substâncias orgânicas antropogênicas e microorganismos patogênicos. Nas fossas sépticas, o nitrogênio está presente em altas concentrações, principalmente como $\text{NH}_3\text{-N}$ (75-80%), com o nitrogênio orgânico perfazendo o restante (Tchobanoglous apud Wilhelm et. al. 1994).

A evolução geoquímica de fossas indica que o nitrato é um dos compostos mais persistentes (conservador) da nitrificação (reação de oxidação) sofrida pelos compostos nitrogenados. É produto final da evolução de NH_4^+ NO_2^- NO_3^- , sendo o NH_4^+ (amônio) o primeiro produto de liberação, seguido do NO_2^- (nitrito), este bastante instável na presença de oxigênio, sendo rapidamente transformado em NO_3^- (nitrato).

Esse tipo de efluente gera carga contaminante conservadora, é lançado continuamente, mas não amplamente, haja vista que na região não há grandes



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

aglomerados urbanos ou rurais. Ainda sim, a classificação de baixa vulnerabilidade, deve ser observada com cautela, já que a região não dispõe de serviço de tratamento de esgotos.

Uma pequena região na parte sudoeste do mapa foi delimitada como *vulnerabilidade média*, descrita como *vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados*. Enquanto que, na parte leste da Área de influência mínima do Sistema Espeleológico Éden, houve duas ocorrências mais restritas de regiões de *alta vulnerabilidade*, o que aponta para situações hidrogeológicas particularmente mais sensíveis em toda a região.

Essas áreas de alta vulnerabilidade coincidem com a ocorrência de dolinas e uvalas na área de afloramento das rochas calcáreas da Formação Sete Lagoas.

Segundo a descrição dessa classificação no método GOD, as áreas de alta vulnerabilidade são: *vulneráveis a muitos contaminantes (exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados) em muitas condições de contaminação*, ou seja, são áreas que devem ser consideradas prioritárias em programas de proteção ambiental, e no que tange à fiscalização de atividades potencialmente contaminantes.

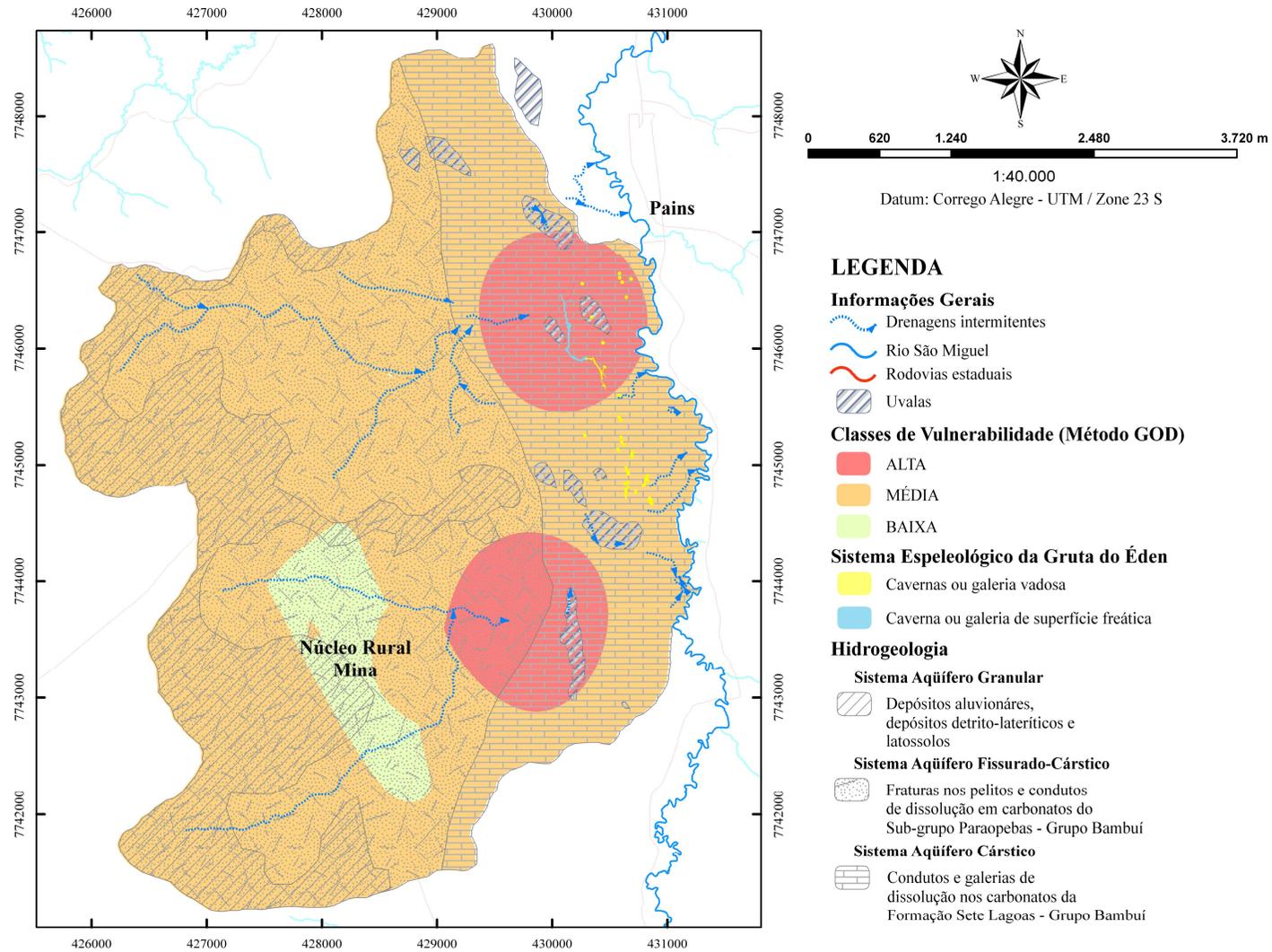


Figura 1 ó Mapa de vulnerabilidade natural (método GOD) para o Sistema Aquífero Físsuro-Cárstico, abrangendo os solos residuais, na área de influência mínima do sistema espeleológico da Gruta do Éden, Pains-MG.

3.2 VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO DO AQUÍFERO CÁRSTICO

A determinação do índice de vulnerabilidade GOD do aquífero cárstico na Zona Cárstica de Pains foi feita com base em informações coletadas de poços tubulares profundos, fornecidos pelo SAAE, utilizados no abastecimento domésticos. Os pontos estão distribuídos sobre a área de ocorrência das rochas calcáreas da Formação Sete Lagoas que compõem o aquífero cárstico, assim como nas regiões adjacentes. Essa avaliação também foi limitada à Área de Influência Mínima do Sistema espeleológico da gruta Éden.

3.2.1 Descrição dos parâmetros do índice de vulnerabilidade GOD

Segue a descrição dos índices obtidos para determinação do índice de vulnerabilidade GOD, utilizados conjuntamente para classificar a vulnerabilidade à contaminação do aquífero cárstico.

- Parâmetro **G** - grau de confinamento da água subterrânea (escala de 0,0 a 1,0);

O grau de confinamento da água subterrânea no aquífero cárstico nos pontos observados é, em grande parte *não-confinado (coberto)* e *não-confinado*, com índices que variam de 0,6 a 1,0; e em alguns casos semi-confinado, onde o índice G é 0,4.

- Parâmetro **O** - ocorrência de estratos de cobertura (escala de 0,4 a 1,0);

O tipo de estrato de cobertura observado para o sistema aquífero cárstico foram *solos residuais* em apenas três pontos (0,4); e calcário e calcário cárstico, com índices entre 0,9 e 1,0. A ausência de cobertura de solo sobre o aquífero cárstico é um dos fatores determinantes para a composição do índice GOD.

- Parâmetro **D** - distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado (escala de 0,6 a 1,0);

A distância do solo até a superfície freática também foi um dos fatores decisivos para constituir o índice de vulnerabilidade GOD para o sistema aquífero cárstico, já que houve a predominância de baixos valores de nível d'água. Os valores predominantes são menores que 5 metros.

Os índices do parâmetro **D** obtidos foram de 0,9 para doze pontos observados, sendo os níveis com valores da ordem de 1 a 5 metros de profundidade. Enquanto que



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

os demais (três pontos) o índice obtido foi de 0,8, para níveis com variações de cerca de 5 a 11 metros de profundidade.

➤ Índice **GOD**

A composição do índice de vulnerabilidade à contaminação GOD exibiu na região estudada situações de baixa a extrema vulnerabilidade do sistema aquífero cárstico, onde os índices GOD variaram de 0,1 a 0,9.

➤ Mapa de Vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Cárstico

O mapa vulnerabilidade à contaminação do Sistema Aquífero Cárstico (Figura 2) apresentou-se dividido geometricamente em faixas transversais com quatro classes de vulnerabilidade natural à contaminação, segundo uma ordem crescente de vulnerabilidade de sul para norte.

Na parte sul e mediana da área de influência mínima do sistema espeleológico Éden ocorre a predominância de classe baixa e média de vulnerabilidade, que segundo o método GOD apontam, respectivamente: 1) *vulnerável somente a contaminantes conservadores, em longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados;* e 2) *vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados.* É uma região onde grande parte da área é recoberta por solos residuais ou calcários. Ainda assim essa classificação deve ser observada com cautela uma vez que há na região aglomerados urbanos e rurais onde não há tratamento de esgotos, sendo assim lançados cargas contaminantes que geram produtos contaminantes (como o nitrato, por exemplo).

Na zona mediana superior e sudeste da área de influência mínima do sistema espeleológico Éden o mapa aponta uma região de alta vulnerabilidade onde em algumas situações coincidem com a ocorrência de uvalas e dolinas, que são feições que dão acesso direto de possíveis contaminantes lançados em superfícies para a superfície do aquífero cárstico, e já apresenta ocorrências significativas de calcários expostos na forma de morros, sem cobertura de solo.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

No extremo norte da área de influência mínima do sistema espeleológico Éden, por sua vez, o mapa mostra uma zona de extrema vulnerabilidade, onde os índices GOD variam entre 0,8 e 0,9. A classe de vulnerabilidade extrema aponta que são regiões *vulneráveis à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação.*

Essa região é particularmente sensível principalmente devido a predominância de afloramentos de calcários expostos, sem cobertura de solos. É uma área de grande circulação hídrica com várias feições de surgência cárstica do sistema espeleológico Éden e bastante fraturada.

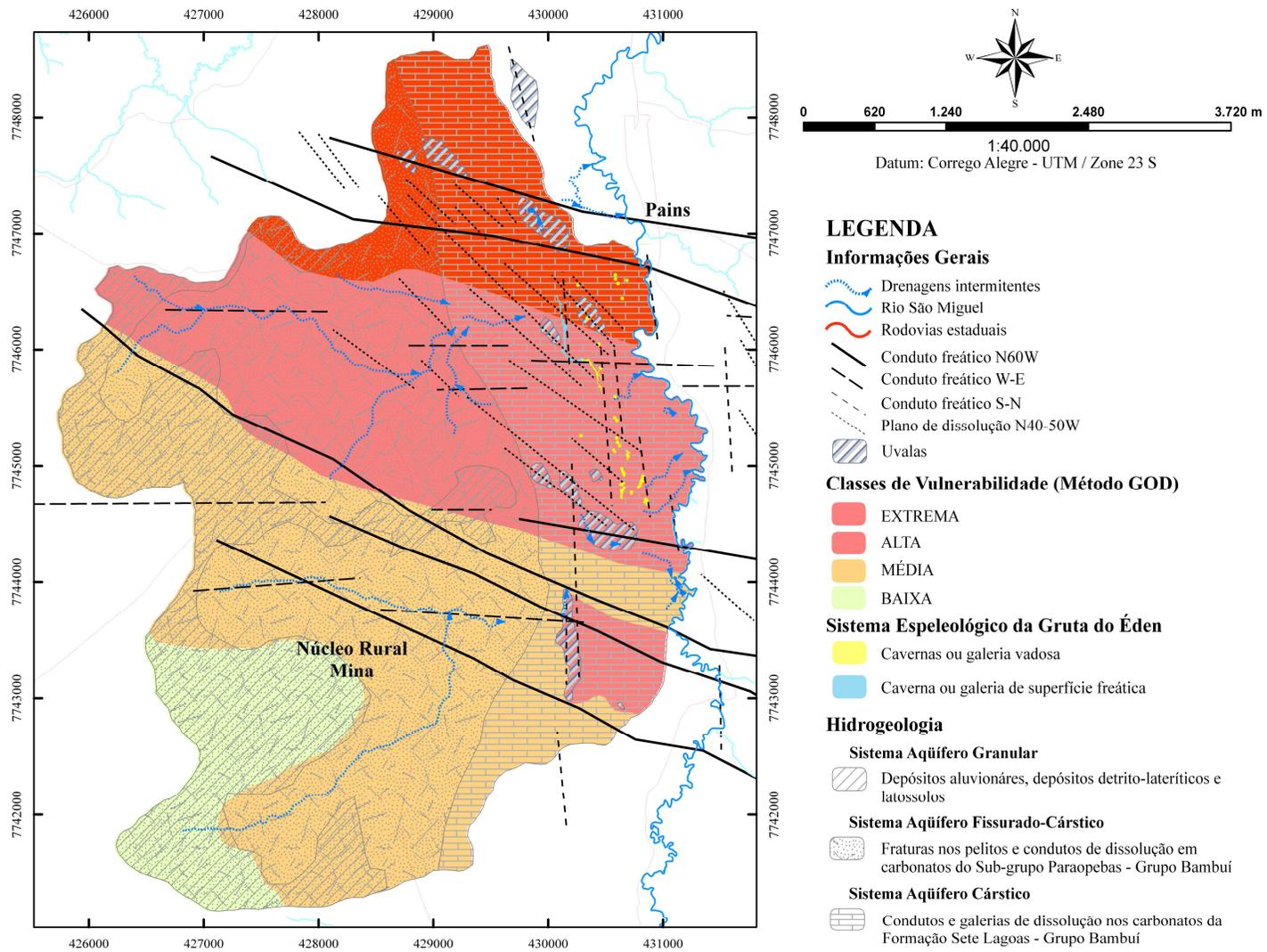


Figura 2 ó Mapa de vulnerabilidade natural (método GOD) para o Sistema Aquífero Cárstico, na área de influência mínima do sistema espeleológico da Gruta do Éden, Pains-MG ..

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os mapas de vulnerabilidade natural à contaminação confeccionados para a Zona Cárstica de Pains, mais especificamente para o limite da área de influência mínima do sistema espeleológico Éden apresentaram coerências dos resultados, haja vista que as regiões de alta e extrema vulnerabilidade coincidem com as áreas mais sensíveis. No mapa do sistema aquífero cárstico, por exemplo, as zonas mais vulneráveis são regiões de carste exposto, e aquelas que apresentam uma maior frequência de feições cársticas como dolinas e uvalas. Essas feições expõem o aquífero cárstico de forma direta para a superfície do terreno, sujeitando-o mais facilmente às ações prejudiciais das atividades antrópicas contaminantes.

Pôde-se notar ainda que as regiões de alta e extrema vulnerabilidade coincidiram com a zona mais desenvolvida da região, em termos de carstificação, e circulação hídrica, o Sistema Espeleológico da Gruta Éden.

Nas regiões de baixa e média vulnerabilidade deve ser dada atenção especial aos aglomerados urbanos onde não há tratamento de esgotos e onde predomina o uso de fossas para saneamento doméstico *in situ*. Nas áreas delimitadas como alta e extrema vulnerabilidade deve-se atentar para todas as atividades potencialmente contaminantes, como postos de gasolina, rede de esgotos, aglomerados urbanos, estradas, lixões, cemitérios, resíduos de mineração. Essas atividades devem ser proibidas nessas regiões ou diante da impossibilidade, severamente monitoradas e reguladas para evitar cenários futuros de contaminação dos aquíferos.

Esses mapas representam importantes ferramentas para o manejo ambiental da região, haja vista que podem nortear as ações dos órgãos gestores de meio ambiente e recursos hídricos e de uso e manejo dos solos, sobretudo na regulação do uso dos solos pelas prefeituras municipais. É importante salientar que os mapas podem ser utilizados separadamente para cada sistema aquífero, dependendo da sua predominância ou forma de ocorrência.

Torna-se prudente também ressaltar a importância do uso do mapa de vulnerabilidade juntamente com informações atualizadas das atividades potencialmente contaminantes da região de Pains, para que se tenha controle das cargas contaminantes geradas e lançadas na superfície do solo ou dispostas em reservatórios específicos.

Para proteger os aquíferos contra a contaminação é necessário restringir ó tanto no presente como no futuro ó o uso do solo, a emissão de efluentes e as práticas de despejo de



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

resíduos. É possível manejar o solo visando exclusivamente a proteção da água subterrânea. O mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação normalmente é o primeiro passo na avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea e na proteção de sua qualidade, em escala municipal ou estadual (Foster *et al.*, 2006).

Um importante valor técnico desse estudo de vulnerabilidade dos aquíferos da Zona Cárstica de Pains refere-se à base que este serve para delimitação mais coerente das cavidades espeleológicas mais sensíveis do ponto de vista hidrogeológico da região. Esses mapas podem fundamentar uma delimitação mais precisa das áreas de influências das cavidades da região, haja vista que a circulação hídrica num sistema espeleológico regula tanto os processos de carstificação, formação e manutenção de espeleotemas e a vida no ambiente cárstico.

Embora seja um estudo preliminar de avaliação da vulnerabilidade e tendo sido desenvolvido em uma área restrita da Zona Cárstica de Pains, ainda assim deve servir de modelo para avaliações de outras áreas na região. Todavia também deve ser otimizado com o emprego de novos métodos como o EPIK, desenvolvido especificamente para aquíferos cársticos, este já discutido por Doerfliger & Zwahlen (1998), Gogu & Dassargues (2000) e Daly *et al.* (2001) segundo Foster *et al.* (2006), no entanto, ainda pouco difundido e utilizado no meio técnico.



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBINET, M. & MARGAT, J. 1970. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau souterraine. Bull BRGM 2me Series 3(4):13-22.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H. AND PETTY; R.J., 1987. DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Groundwater Pollution Potential Using Hydrogeological Settings. U.S.EPA Report 600/2-85/018.
- BARBOZA, A. E. C.; ROCHA, S. F. & GUIMARÃES, W. D. 2007. Estudo preliminar da vulnerabilidade do aquífero livre localizado na região de Ponta da Fruta, Vila Velha ó ES. *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3279-3286.
- FOSTER, S. S. D. & HIRATA, R. C. A. 1993. *Determinação do Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas: Um Método Baseado em Dados Existentes*. São Paulo, Instituto Geológico, v. 10, p. il., tabs. 23cm. (Boletim).
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C.; GOMES, D.; D'ELIA, M. & PARIS, M. 2006. Proteção da qualidade da água subterrânea: Um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Mundial, 104p.
- FOSTER, S. & HIRATA, R. 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology based on available data. CEPIS/PAHO *Technical Report*. Lima, Peru.
- FOSTER, S. 1987. Fundamental concept in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. *Proc. Intl. Conf. Vulnerability of soil and groundwater to pollution* (Nordwijk, The Netherlands, April 1987).
- HIRATA, R. 2001. Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquíferos. Seminario-Taller. Protección de Acuíferos Frente a la Contaminación: *Metodología*. Toluca, México. Disponível em: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Hirata.html>, acesso em: 27/11/2006.
- HIRATA, R. & FERREIRA, L. M. R. 2001. Os aquíferos da bacia hidrográfica do alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. *Revista Brasileira de Geociências* 31(1):43-50.
- HIRATA, R.C.A. 1994. Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas. Estudo de casos no Estado de São Paulo. São Paulo. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 195p. (*Tese de Doutorado*).



MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE
INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS
DIRETORIA DE ECOSISTEMAS
CENTRO NACIONAL DE ESTUDO, PROTEÇÃO E MANEJO DE CAVERNAS.
SCEN Av. L4 Norte, Ed Sede do CECAV, CEP.: 70818-900
Telefones: (61) 3316.1175/3316.1572 FAX: (61) 3223.6750

- LE GRAND, H. 1964. System for evaluating contamination potential for some waste sites. American Water Work Association Journal. V.56 (8):959-974.
- MARTINEZ, M. M. & SILVA, J. L. S. 2004. Avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas no município de santa cruz do sul, RS/BRASIL. *XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Cuiabá ó MT.
- SANTOS, M. M.; CAETANO-CHANG, M. R.; KIANG, C. H. & CELLIGOI, A. 2006. Avaliação da vulnerabilidade natural à poluição utilizando o índice DRASTIC em área selecionada na cidade de Londrina (PR). *Águas subterrâneas*, v.20, n.1, p.29-46.
- WILHELM, S. R.; SCHIFF, S. L.; CHERRY, J. A. 1994. Biogeochemical Evolution of Domestic Waste Water in Septic Systems: 1. Conceptual Model. *Groundwater*, 32 (6): 905 ó 916.