



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

PAULO HENRIQUE PRATES MAIA

**UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAR A
VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS**

Salvador/BA,
2011

PAULO HENRIQUE PRATES MAIA

**UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAR A
VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS**

Tese de Doutorado apresentada à Câmara de Ensino de Pesquisa e de Pós-Graduação, da Universidade Federal da Bahia, do Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos, submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciências – Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Jerônimo Moreira Cruz

Salvador/BA,
2011

PAULO HENRIQUE PRATES MAIA

UM NOVO MÉTODO PARA AVALIAR A VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS

Tese de Doutorado apresentada à Câmara de Ensino de Pesquisa e de Pós-Graduação, da Universidade Federal da Bahia, do Curso de Pós-Graduação em Geologia, área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos, submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciências – Geologia.

Câmara de Ensino de Pesquisa e Pós-Graduação
da Universidade Federal da Bahia

BANCA EXAMINADORA

- | | |
|--|-----------------------------------|
| Prof. Dr. Antônio Fernando de Souza Queiroz | - IGEO/NEA/UFBA |
| Prof. Dr. Heraldo Peixoto da Silva | - IGEO/DGEO/UFBA |
| Prof. Dr. José Ângelo Sebastião Araújo dos Anjos | - Universidade Salvador (UNIFACS) |
| Prof. Dr. Marco Antonio Nogueira Fernandes | - Instituto de Matemática (UFBA) |
|
 | |
| Prof. Dr. Manoel Jerônimo Moreira Cruz | – UFBA (Orientador) |

M217 Maia, Paulo Henrique Prates

Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos /
Paulo Henrique Prates Maia. - Salvador, 2011.
133f. : il. + Anexos

Orientador: Prof. Dr. Manoel Jerônimo Moreira Cruz.
Tese (Doutorado) – Curso de Pós-Graduação em Geologia, Universidade
Federal da Bahia, Instituto de Geociências, 2011.

1. Aquíferos. 2. Água – Qualidade. 3. Vulnerabilidade. 4. Método MAIA
I. Cruz, Manoel Jerônimo Moreira. II. Universidade Federal da Bahia.
Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 556.33

Elaborada pela Biblioteca do Instituto de Geociências da UFBA.

*Este trabalho é dedicado a
Haydê ,Otto e Débora.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente a Deus, que me deu forças para superar as dificuldades no decorrer dessa jornada de aprendizado.

A Haydê, Débora e Otto pelo valioso estímulo e cooperação.

Ao professor Doutor Manoel Jerônimo Moreira Cruz pelas orientações, discussões e sugestões que tanto contribuíram para aprofundar a pesquisa.

Sinceros agradecimentos a Regina Francisco pela confecção e padronização das tabelas e gráficos, pela paciência em esclarecer minhas dúvidas e, principalmente, pela leitura e revisão dos textos.

Aos colegas Ricardo de Sousa Rodrigues e a Jeferson Vilhena pelo apoio na elaboração dos mapas temáticos, pelo tratamento dos dados e pela aplicação dos softwares Excel e Surfer 8.0.

Agradecimentos especiais para Zoltan Romero Cavalcante Rodrigues, pelo grande incentivo na execução dos trabalhos.

Ao professor Sérgio Nascimento pelas discussões e sugestões que contribuíram efetivamente para o progresso da pesquisa.

Ao companheiro Gláucio Rocha cujos questionamentos nos fizeram rever conceitos e redirecionar as pesquisas.

Ao mestrando Eder Medeiros pelas contribuições relativas aos ajustes na base cartográfica e na confecção de mapas.

A colega Maria Isabel e aos estagiários, Luciano da Mata e Mariana Cayres, pelo apoio na elaboração de mapas e confecção de alguns gráficos e tabelas.

Ao corpo docente, da Universidade Federal da Bahia (UFBA), que contribuiu para ampliar nosso conhecimento sobre o tema e ofereceu condições para realizar a pesquisa.

E, por fim, a Superintendência de Recursos Hídricos – SRH, o atual Instituto de Gestão das Águas e Clima - INGÁ que facilitou a participação do técnico com a flexibilização do horário de trabalho e a liberação do ponto quando se fez necessário.

*Só se sabe o valor da água
quando o poço seca.*

Thomas Fuller

RESUMO

O mapeamento dos índices de vulnerabilidade é útil para o planejamento do uso da terra e da água, particularmente na preservação da qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. Para assegurar o uso sustentável da água e a adequada proteção do aquífero é necessário conhecer as áreas de maior vulnerabilidade à contaminação e estabelecer programas específicos de inspeção e monitoramento. O principal escopo desta pesquisa é desenvolver um método, no qual a vulnerabilidade seja determinada priorizando aspectos quantitativos sobre os qualitativos, procurando definir as variáveis com a menor subjetividade possível de maneira a permitir a comparação das vulnerabilidades dos diversos tipos de aquíferos em diferentes regiões. A partir da análise dos componentes do sistema foram selecionadas as variáveis medidas para serem utilizadas no modelo. A análise das relações entre as variáveis e a vulnerabilidade foi determinante para a dedução do modelo algébrico proposto, tornando-o capaz de expressar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos. A ênfase de sua construção foi a organização de componentes interdependentes para atuarem juntos em uma equação. O resultado é um novo método capaz de descrever a vulnerabilidade dos aquíferos, utilizando um conjunto de componentes inter-relacionados que cooperam para um objetivo comum, o índice de vulnerabilidade. A validação do método foi em Lençóis e Lagedinho em todos os tipos de aquíferos e o mapeamento da vulnerabilidade foi realizada na região de Aracatu. Este método é representado por uma equação algébrica constituída por um conjunto de relações matemáticas e lógicas entre as variáveis e a vulnerabilidade com termos definidos de forma clara, onde as relações matemáticas entre as variáveis e a vulnerabilidade são precisamente descritas.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Novo Método. Aquíferos. Qualidade.

ABSTRACT

The mapping of vulnerability indices is useful for planning the use of land and water, particularly in preserving the quality of groundwater resources. To ensure the sustainable use of water and adequate protection of the aquifer is necessary to know the areas most vulnerable to contamination and establish programs specific inspection and monitoring. The main scope of this research is to develop a method, in which the vulnerability is determined prioritizing quantitative aspects on the qualitative ones, seeking to define the variables with the smallest possible subjectivity in order to allow comparison of the vulnerabilities of various types of aquifers in different regions. From the analysis of system components were selected measured variables to be used in the model. The analysis of the relationships between variables and vulnerability was decisive for the deduction of the algebraic model proposed, making it capable of expressing the intrinsic vulnerability of aquifers. The emphasis of its construction was the organization of interdependent components to act together in an equation. The result is a new method capable of describing the vulnerability of aquifers, using a set of interrelated components working together toward a common goal, the index of vulnerability. The validation of the method was Lençóis and Lagedinho in all types of aquifers and the vulnerability mapping was performed in the region of Aracatu. This method is represented by an algebraic equation consisting of a set of mathematical and logical relationships between variables and vulnerability as defined clearly, where the mathematical relationships between variables and vulnerability are precisely described.

Keywords: Vulnerability. New Method. Aquifers. Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama para aplicação do GOD	39
Figura 2 - Procedimentos adotados na determinação do índice GOD	40
Figura 3 - Pesos Relativos das Variáveis do SINTACS	45
Figura 4 - Potenciais Hidráulicos Naturais – Aquífero Livre e Semiconfinado	55
Figura 5 - Contaminação por Bombeio- Aquífero Semiconfinado	55
Figura 6 - Fluxo Através do Aquitardo - Potenciais Hidráulicos Naturais	56
Figura 7 - Fluxo Através do Aquitardo - Potenciais Hidráulicos Artificiais	57
Figura 8 - Fluxo Através do Aquitardo por Variação da Transmissividade Vertical	57
Figura 9 - Distribuição da Frequência de Profundidades dos perfis de Solo	81
Figura 10 - Índices de Vulnerabilidade X Variáveis com Relação Inversa	90
Figura 11 - Índices de Vulnerabilidade X Variáveis com Relação Direta	91
Figura 12 - Modelo para Determinar os Índices de Vulnerabilidade	92
Figura 13 - Correlação entre o Coeficiente Hidráulico e a Transmissividade	94
Figura 14 – Área Piloto para Aplicação Experimental nos Municípios de Lençóis e de Lagedinho	98
Figura 15 - Correlação entre os Índices DRASTIC e GOD	104
Figura 16 - Correlação entre os Índices MAIA e DRASTIC	104
Figura 17 - Correlação entre os Índices MAIA e GOD	105
Figura 18 - Mapa do Índice de Vulnerabilidade MAIA, no Município de Aracatu	112
Figura 19 - Correlação do Índice de Vulnerabilidade MAIA com a Concentração de Nitratos	113
Figura 20 - Mapa do Índice de Vulnerabilidade DRASTIC no Município de Aracatu	115
Figura 21 - Correlação do Índice de Vulnerabilidade DRASTIC com a Concentração de Nitratos	116
Figura 22 - Mapa do Índice de Vulnerabilidade GOD no Município de Aracatu	118
Figura 23 - Correlação do Índice de Vulnerabilidade GOD com a Concentração de Nitratos	119
Figura 24 - Distribuição da Pluviosidade Média Anual no Município de Aracatu	122
Figura 25 - Modelo Numérico do Terreno do Município de Aracatu	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero de Beja	15
Tabela 2 - Métodos Mais Conhecidos	34
Tabela 3 - Classes de Vulnerabilidade do Método EPPNA	35
Tabela 4 - Índices de Vulnerabilidade da Profundidade da Superfície Freática no E.Kv	36
Tabela 5 - Índices de Vulnerabilidade da Zona Subsaturada	36
Tabela 6 – Diagrama da Vulnerabilidade de Aquíferos Livres	37
Tabela 7 - Variáveis Utilizadas no Método DRASTIC	43
Tabela 8 - Fatores de Ponderação do Método DRASTIC	43
Tabela 9 - Intervalos das Variáveis e Valores Utilizados no Método DRASTIC	46
Tabela 10 - Valores dos Parâmetros para o EPIK	48
Tabela 11 - Classes de Vulnerabilidade do método AVI	50
Tabela 12 - Parâmetros e Ponderadores do Método IS	51
Tabela 13 – Classes de Vulnerabilidade do Método IS	51
Tabela 14 - Parâmetros e Fatores de Ponderação do Índice de Susceptibilidade em Portugal	52
Tabela 15 - Classes e Valores Atribuídos aos Parâmetros do Índice de Susceptibilidade	53
Tabela 16 - Parâmetros e Ponderadores do Método DRASTIC PESTICIDE	54
Tabela 17 - Vulnerabilidade do Aquífero Semiconfinado em Relação ao Livre Associado	58
Tabela 18 - Vulnerabilidade do Aquífero Semiconfinado em Relação a Transmissividade Vertical do Aquífero Sobreposto	58
Tabela 19 - Síntese com as Equações e Variáveis dos Principais Métodos	59
Tabela 20 - Variáveis Medidas e Estimadas para o Cálculo da Vulnerabilidade dos Principais Métodos	61
Tabela 21 – Características das Variáveis Tradicionais e Propostas para O Cálculo da Vulnerabilidade	85
Tabelas 22 - Variáveis com Relação Direta (X) e Variáveis com Relação Inversa (Y)	88
Tabela 23 - Índices de Vulnerabilidade Obtidos na Simulação	90

Tabela 24 - Determinação da Transmissividade e do Coeficiente Hidráulico	93
Tabela 25 – Matriz de Correlação das Variáveis	94
Tabela 26- Cálculo do Índice de Vulnerabilidade MAIA na Área Piloto	99
Tabela 27- Correlação das Variáveis Utilizadas no Método com o Índice MAIA	101
Tabela 28 – Matriz de Correlação das Variáveis Utilizadas no Cálculo do Índice MAIA	102
Tabela 29 – Comparação dos Índices de Vulnerabilidade DRASTIC, GOD e MAIA	103
Tabela 30 – Cálculo do Índice de Vulnerabilidade MAIA no Município de Aracatu	109
Tabela 31 - Correlação das Variáveis com os Índices de Vulnerabilidade MAIA	110
Tabela 32 – Cálculo do Índice DRASTIC no Município de Aracatu	114
Tabela 33 – Cálculo do Índice GOD no município de Aracatu	117
Tabela 34 – Correlação dos Índices de Vulnerabilidade com as Concentrações De Concentrações de Nitrato no Município de Aracatu	120

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMA	15
1.2	A HIPÓTESE DO TRABALHO	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Geral	17
1.3.2	Específicos	17
1.4	METODOLOGIA	18
1.4.1	Pesquisa Bibliográfica	18
1.4.2	Análise dos Métodos	18
1.4.3	Análise das Variáveis	18
1.4.4	Seleção das Variáveis	19
1.4.5	Dedução da Equação do Novo Método	19
1.4.6	Tratamento dos Dados	19
1.4.7	Simulando a Aplicação do Novo Método	19
1.4.8	Aplicação Experimental nos Municípios de Lençóis e Lagedinho	20
1.4.9	Cartografia da Vulnerabilidade dos Aquíferos em Aracatu	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	30
3	MÉTODOS PARA AVALIAR A VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS	33
3.1	CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS	33
3.2	MÉTODOS MAIS CONHECIDOS	34
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS MÉTODOS MAIS UTILIZADOS	35
3.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	60
4	AS VARIÁVEIS	62
4.1	VARIÁVEIS MAIS UTILIZADAS	62

4.2	PROPOSTA DE NOVAS VARIÁVEIS	77
4.3	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	83
5	O NOVO MÉTODO	86
5.1	SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA O NOVO MÉTODO	86
5.2	DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO	86
5.3	SIMULANDO UMA MODELAGEM DA VULNERABILIDADE COM O MÉTODO MAIA	88
5.4	CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUNS TERMOS DA EQUAÇÃO	91
5.5	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	95
6	APLICAÇÃO EXPERIMENTAL	97
6.1	APLICAÇÃO NOS MUNICÍPIOS DE LENÇÓIS E LAGEDINHO	97
6.2	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	105
7	CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE NO MUNICÍPIO DE ARACATU	107
7.1	CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE COM O MÉTODO MAIA	107
7.2	CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE COM O MÉTODO DRASTIC	113
7.3	CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE COM O MÉTODO GOD	117
7.4	CONCLUSÕES DO CAPÍTULO	120
8	CONCLUSÕES FINAIS	124
	REFERÊNCIAS	127
	APÊNDICES	133

1 INTRODUÇÃO

Aqui se faz uma breve introdução na qual são descritos: o problema abordado, a hipótese de trabalho, o objetivo e a metodologia aplicada na pesquisa.

1.1 PROBLEMA

Quando se trata da vulnerabilidade do aquífero à contaminação, o problema é a proposição de um índice de vulnerabilidade no qual sejam priorizados os aspectos quantitativos sobre os qualitativos e que seja um indicador da vulnerabilidade de todos os tipos de aquíferos.

A aplicação de diversos métodos empíricos em uma mesma área produz resultados bastante diferentes como pode ser observado na tabela abaixo que apresenta a determinação da vulnerabilidade do Sistema Aquífero de Beja, em Portugal, com uso de diferentes métodos (Tabela 1).

Tabela 1 – Índices de Vulnerabilidade do Sistema Aquífero de Beja

MÉTODO	TIPO DE ÍNDICE	CLASSE	VULNERABILIDADE
DRASTIC	Numérico	100 – 119	Baixa
DRASTIC PESTICIDE	Numérico	120 – 139	Baixa a Média
IS	Numérico	65 a 75%	Média a Alta
AVI	Numérico	1 a 2,7	Moderada/Extremamente Alta
GOD	Numérico	0,2 a 0,4	Baixa a Moderada
EPPNA	Qualitativo	V6	Baixa a Variável

Fonte: Paralta, Frances & Ribeiro (2005).

Os fatores que influenciam o comportamento hidrogeológico dos aquíferos variam: nos aquíferos Fissurais, dependem da intensidade do fraturamento; nos Cársticos, do grau de carstificação e, nos Granulares, de ambientes deposicionais e processos diagenéticos. Esses fatores não são avaliados de forma adequada nos principais métodos.

Os métodos tradicionais para avaliar a vulnerabilidade foram desenvolvidos, de maneira geral, para um tipo particular de aquífero, os granulares, utilizando em suas equações algumas variáveis vinculadas a litologias e solos. Essas variáveis determinadas por meio de tabelas em mesmo tipo de aquífero resultam em valores muito próximos ou repetidos que provocam distorções nos índices e dificulta a comparação da vulnerabilidade de aquíferos.

Outra questão abordada foi o das variáveis medidas em unidades de natureza diversa com intervalos de valores de diferentes amplitudes que provocam impactos diferenciados nas equações e justificam o uso de fatores de ponderação.

1.2 A HIPÓTESE DE TRABALHO

A vulnerabilidade pode ser modelada utilizando as características naturais do meio aquífero, variáveis devidamente medidas, que oferecem diferentes graus de proteção ou vulnerabilidade.

A vulnerabilidade intrínseca de um aquífero é caracterizada por meio dos seguintes fatores naturais: a) acessibilidade da zona saturada à penetração de poluentes; b) capacidade de atenuação resultante da retenção físico-química ou reação ao poluente na zona não saturada; c) a diluição e a remobilização dos elementos na água e no solo. (FOSTER *et al.*, 2006).

A atuação desses fatores pode ser avaliada com aplicação de variáveis que representam características do meio aquífero, relacionadas com sua vulnerabilidade ou proteção, em uma equação matemática que traduz um índice de vulnerabilidade. O pressuposto na concepção do método foi o de selecionar somente as variáveis que podem ser medidas para compor uma equação para o cálculo do índice.

As variáveis são medidas em unidades de natureza diferentes com intervalos de valores de amplitudes diversas que provocam impactos diferenciados nas equações. Com o objetivo de evitar o uso de fatores de ponderação, como aqueles utilizados nos métodos tradicionais para amplificar ou minimizar os efeitos das variáveis no cálculo, foi importante pesquisar uma forma de tratar os valores e colocá-

los em uma escala adequada sem que estes percam a relação com os valores medidos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método no qual a vulnerabilidade seja determinada priorizando aspectos quantitativos sobre os qualitativos, procurando definir as variáveis com a menor subjetividade possível para permitir a comparação da vulnerabilidade de todos os tipos de aquíferos. Um método no qual os fatores de ponderação utilizados nas equações dos métodos tradicionais sejam eliminados e, que as variáveis sejam medidas e não determinadas por meio de tabelas.

Um novo método para modelar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos com um sistema algébrico, constituído por um conjunto de variáveis ou entidades independentes relacionadas com as defesas naturais dos aquíferos que cooperam para um objetivo comum, a proteção ou a vulnerabilidade dos mesmos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar os diversos métodos existentes, decompor suas equações, analisar as variáveis e selecionar somente aquelas mensuráveis que imprimem fatores de proteção ou de vulnerabilidade aos aquíferos.

- Determinar as relações das variáveis com a vulnerabilidade e a partir dessas relações deduzir a equação do novo método.

- Aplicar o novo método em conjunto com dois métodos tradicionais em diversos tipos de aquíferos para comparar os resultados e avaliar seu comportamento em escala regional.

- Modelar a vulnerabilidade utilizando os métodos DRASTIC, GOD e MAIA no município de Aracatu, sudoeste do Estado, para validar o novo método na cartografia da vulnerabilidade dos aquíferos.

- Modelar a vulnerabilidade utilizando os métodos DRASTIC, GOD e MAIA no município de Aracatu, sudoeste do Estado, para validar o novo método na cartografia da vulnerabilidade dos aquíferos.

1.4 A METODOLOGIA

1.4.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa foi iniciada por uma ampla consulta as referencias sobre o estado da arte na vulnerabilidade dos aquíferos. Todos os dados e informações relativas aos conceitos, métodos e componentes foram levantados nesta fase e armazenados em um dispositivo modelado para essa finalidade. A análise de livros, teses e artigos científicos publicados sobre a vulnerabilidade de aquíferos propiciou uma melhor compreensão sobre o assunto.

1.4.2 Análise dos Métodos

Com o objetivo de entender a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, inicialmente foram descritos e analisados os métodos mais utilizados, procurando conhecer as técnicas usadas. Suas equações foram então decompostas para avaliar o alcance de cada variável na proteção do aquífero e, compreender os princípios usados internacionalmente na qualificação da vulnerabilidade. Foram verificados os pontos fortes e as deficiências de cada método com a finalidade de aproveitar o que tem de melhor em cada um deles.

1.4.3 Análise das Variáveis

Nesta etapa foram avaliadas, tanto as variáveis conhecidas como as novas propostas nesta pesquisa com o objetivo de identificar as mais indicadas para compor a equação do novo método para o cálculo da vulnerabilidade. As variáveis foram então descritas com o objetivo de entender o papel dos fatores de proteção natural

que elas representam e seu rebatimento na vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos. Foram descritas a forma de obtenção, efeitos de proteção, relação com a vulnerabilidade e natureza da variável, limitações e eficiência.

1.4.4 Seleção das Variáveis

A análise das variáveis propiciou momentos de reflexão sobre a eficiência de cada uma delas e possibilitou ainda identificar novas variáveis passíveis de serem utilizadas no método pesquisado. A partir da avaliação foram então selecionadas somente as variáveis do sistema aquífero que podem ser medidas.

1.4.5 Dedução da Equação do Novo Método

A relação entre as variáveis selecionadas e a vulnerabilidade foi determinante para a dedução de um modelo algébrico capaz de expressar a vulnerabilidade de todos os tipos de aquíferos. Foram então desenvolvidas as equações para descrever a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos, utilizando somente variáveis passíveis de serem mensuradas

1.4.6 Tratamento dos Dados

Um dos problemas equacionados pela pesquisa foi a diferença de amplitudes nos valores das variáveis que sempre provocam impactos diferentes nas equações e que justificaram o uso de Fatores de Ponderação dos métodos tradicionais. Para eliminar os fatores de ponderação, os valores das variáveis foram colocados em uma escala equivalente, considerando o menor valor um e o maior dez. As escalas são proporcionais e, todas as equivalentes são de mesma amplitude.

1.4.7 Simulando a Aplicação do Novo Método

Aqui foi simulada a modelagem da vulnerabilidade dos aquíferos, admitindo que os valores das variáveis medidas foram colocados em uma escala equivalente e aplicados na equação de acordo com o preconizado pelo método.

1.4.8 Aplicação Experimental nos Municípios de Lençóis e Lagedinho

Uma vez deduzida as equações, foi escolhida uma área piloto com todos os tipos de aquíferos para aplicar experimentalmente o novo método e avaliar o seu comportamento em uma aplicação regional. A área selecionada está localizada nos municípios de Lençóis e Lagedinho na Chapada Diamantina onde afloram aquíferos: Granulares, Cársticos, Metassedimentares e Cristalinos.

1.4.9 Cartografia da Vulnerabilidade dos Aquíferos em Aracatu

Com a finalidade de comparar os resultados, a vulnerabilidade dos aquíferos no município de Aracatu foi modelada utilizando os métodos MAIA, DRASTIC e GOD. A escolha da área decorreu do fato de que a dissertação de mestrado do autor foi sobre “Meio Ambiente e Potencialidades Hídricas na Região de Aracatu – Sudoeste da Bahia” (MAIA, 2005) que se dispõe dos dados necessários para aplicação dos três métodos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aqui se faz uma breve referência às definições, aos métodos e aos componentes que sintetizam o estado da arte sobre a vulnerabilidade dos aquíferos a partir da revisão bibliográfica.

O conceito de vulnerabilidade, de acordo com Hirata (2001), começou a ser usado inicialmente por Le Grand (1964) e posteriormente de forma intuitiva por Albinet e Margat (1970) na França, e de maneira mais ampla na década de 1980 (Haertle, 1983; Aller et al., 1985; Bachmat & Collin, 1987; Foster, 1987; Foster e Hirata, 1988) e na década de 1990 (Lobo Ferreira e Cabral, 1991; Adams e Foster, 1992; Carbonel,, 1993; VRBA & Zaporozec, 1994; Custódio, 1995), entre tantos outros.

De acordo com Auge (2004) têm surgido inúmeras definições, qualificações e metodologias sobre a vulnerabilidade dos aquíferos, entretanto, não há um consenso sobre o alcance do termo. Neste sentido existem duas grandes correntes: aqueles investigadores que consideram a vulnerabilidade como uma propriedade referente ao meio (vulnerabilidade intrínseca) e outros que consideram, além do comportamento do meio aquífero, a carga contaminante (vulnerabilidade específica).

Auge (2004) faz referência às inúmeras definições desde que se introduziu o termo vulnerabilidade da água subterrânea a contaminação.

A vulnerabilidade é definida como uma propriedade intrínseca do sistema de água subterrânea que depende da sensibilidade do mesmo aos impactos humanos e/ou naturais, os autores incluem na definição, tanto o sistema subterrâneo como os contaminantes, incluindo aí os naturais e artificiais. (VRBA e ZAPOROZEC, 1994). Os mesmos autores referem à vulnerabilidade específica, como o perigo de contaminação da água subterrânea pôr um contaminante ou família de contaminantes com características e comportamentos similares, como por exemplo, nitratos, hidrocarbonetos leves e pesados, praguicidas, matéria orgânica e metais.

Foster e Hirata (1991) afirmam que “a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação, representa sua sensibilidade para ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta.” Neste caso ao citar uma carga contaminante imposta, os autores parecem referir-se somente a uma contaminação de origem artificial.

Custódio (1995) enfatiza que “a vulnerabilidade à poluição expressa a incapacidade do sistema de absorver as alterações, tanto naturais como artificiais.” Voltam a aparecer aqui processos naturais e/ou artificiais, como potenciais geradores de alterações.

O autor Carbonell (1993) destaca ainda que, a vulnerabilidade à contaminação é a tendência dos contaminantes a disseminar-se no sistema de águas subterrâneas, após serem derramados na cobertura superior do aquífero. E neste caso o autor considera somente a ação dos contaminantes.

EPA (1991) faz referência à vulnerabilidade subterrânea em relação a um agrotóxico como a facilidade com que o contaminante aplicado na superfície pode alcançar o aquífero em função das práticas agrícolas empregadas, as características do agrotóxico e a susceptibilidade hidrogeológica. Esta definição incorpora além das condições do meio aquífero, as propriedades do contaminante e as práticas de cultivo (vulnerabilidade específica).

Alguns autores como Foster (1987) definem o risco como “o perigo de perda da qualidade da água armazenada em um aquífero, pela existência real ou potencial de substâncias contaminantes em seu entorno”.

“Embora se referisse à susceptibilidade relativa dos aquíferos à contaminação antropogênica, o termo inicialmente era usado sem nenhum objetivo de definição formal. A expressão passou a ter diferentes significados para diferentes pessoas” (FOSTER *et al.*,2006).

A atenção dos pesquisadores, principalmente nos últimos 30 anos, tem sido uma consequência da crescente preocupação da sociedade com a degradação dos recursos hídricos subterrâneos, tanto no meio urbano quanto rural. É cada vez mais clara a consciência dos responsáveis pela gestão das águas subterrâneas, das limitações técnicas, econômicas e de disponibilidade de mão de obra especializada para remediar a contaminação existente, sobretudo em países em desenvolvimento. (HIRATA, 2001).

Nas últimas três décadas têm-se verificado um crescente desenvolvimento de modelos e técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à poluição de aquíferos, como

uma ferramenta para sua proteção. A cartografia de vulnerabilidade tem servido a racionalização de ações de proteção de aquíferos, na medida em que tenta compatibilizar as atividades antrópicas com a capacidade do terreno em suportá-las, sem prejuízo das águas subterrâneas. (HIRATA, 2001)

Segundo Aguêro, Valverde e Mesalles (2002), para assegurar a sustentabilidade do uso dos recursos hídricos subterrâneos é necessário uma adequada proteção, conhecendo-se as zonas de maior vulnerabilidade à contaminação e estabelecendo programas específicos de inspeção e monitoramento sobre possíveis fontes de contaminação.

Os autores acima ainda complementam os diferentes modelos propostos para a determinação da vulnerabilidade à contaminação de um aquífero são modelos matemáticos que fazem uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), para gerar mapas de vulnerabilidade e desta forma, estimar o perigo de contaminação.

“A vulnerabilidade está sempre relacionada à maior ou menor fragilidade de um determinado ambiente e, pode ser expressa pela “qualidade de ser vulnerável, susceptível, de ser ofendido ou tocado.” (KOOGAN *et al.*, 1994). O conceito de vulnerabilidade de um aquífero foi baseado, primeiramente, na suposição de que determinadas características do meio aquífero podem oferecer algum grau de proteção da água subterrânea contra o impacto humano e natural.

Segundo Auge (2003), a vulnerabilidade é considerada uma propriedade intrínseca ao meio, sendo empregada de forma abrangente tanto em trabalhos de planejamento de uso do território, quanto da água. A vulnerabilidade específica inclui a concepção de risco, quando estiver relacionada ao perigo de deterioração a partir da presença de substância contaminante.

Uma definição útil e consistente seria considerar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação como o conjunto de características intrínsecas dos estratos que separam o aquífero saturado da superfície do solo, o que determina sua susceptibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante aplicada na superfície. (FOSTER, 1987).

O perigo de contaminação da água subterrânea seria então definido como a probabilidade da água subterrânea, na parte superior de um aquífero, atinja níveis

inaceitáveis de contaminação em decorrência das atividades que se realizam na cobertura imediata da superfície do solo. (FOSTER e HIRATA, 1988; ADAMS e FOSTER, 1992; FOSTER *et al.*, 2006).

A vulnerabilidade específica inclui parcialmente o conceito de risco toda vez que se refere ao perigo de deterioração do aquífero com relação a substâncias contaminantes específicas (AUGE *et al.*, 2003). Este mesmo autor ainda enfatiza que há mais de 30 anos, desde a introdução do termo vulnerabilidade de aquíferos, ainda se discute a definição e o alcance do mesmo. Neste sentido, a maioria dos autores considera a vulnerabilidade uma propriedade qualitativa, que indica o grau de proteção natural de um aquífero em relação à contaminação, e de maneira geral, qualificando-a como baixa, média, alta e às vezes, muito alta e muito baixa. (AUGE, 2004).

Vale ressaltar que, dois importantes grupos de trabalho revisaram e opinaram sobre a aplicabilidade do conceito de vulnerabilidade, decidindo fortemente em favor de sua utilidade. (NRC, 1991; IAH/VRBA e ZAPOROZEC, 1994).

Seria desejável que eles tivessem enunciado o uso do termo de maneira mais clara, por exemplo, associando-o especificamente às características intrínsecas dos estratos (zona não saturada ou camadas confinantes) que separam o aquífero saturado da superfície do solo. Assim (o que é extremamente importante), teria se estabelecido uma relação direta entre o termo e o impacto potencial das decisões sobre o uso do solo nos locais voltados para a água subterrânea imediatamente subjacente. (FOSTER *et al.*, 2006).

Foster *et al* (1988) destaca que, a caracterização mais aproximada da idéia de risco de poluição de água subterrânea consiste na associação e interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante (vulnerabilidade específica), aplicada no solo ou em subsuperfície sem estar necessariamente associada a desastres naturais. Muitas vezes uma situação de alta vulnerabilidade pode não apresentar qualquer risco de poluição pela ausência de carga poluidora significativa ou vice-versa. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada, o mesmo não ocorre com a vulnerabilidade natural que é uma propriedade intrínseca do aquífero.

Auge *et al.* (2003) estabelecem uma comparação entre risco e vulnerabilidade ao tomar como exemplo, um depósito com portas sem chave e cadeado localizado na zona rural e remota, muito vulnerável devido ao fácil acesso, entretanto, o risco de furto ou roubo dos objetos que estão no seu interior é baixo, porque na região não existem vândalos, contudo, outro depósito localizado em zona urbana com fechaduras e cadeados, apresenta uma vulnerabilidade e um risco alto, devido à presença de delinqüentes na área.

Hirata (2001) traz a observação acerca da perspectiva em discussão, afirma ter-se verificado um crescente desenvolvimento de modelos e técnicas de mapeamento de vulnerabilidade à poluição de aquífero, como uma ferramenta para sua proteção. A cartografia de vulnerabilidade tem servido a racionalização de ações de proteção de aquífero, na medida em que tenta compatibilizar as atividades antrópicas com a capacidade do terreno em suportá-las, sem prejuízo à qualidade das águas subterrâneas.

Observa-se, segundo Foster *et al.* (1988) que o exame conjunto através de mapas, das áreas mais vulneráveis em associação com fontes de contaminação potencialmente perigosas ressaltará áreas críticas que serão objetos de estudos de detalhe, com programa de monitorização e de medidas especiais de proteção.

“Entretanto, a caracterização mais aproximada da idéia de risco de poluição de água subterrânea consiste na associação e interação entre a vulnerabilidade natural do aquífero e a carga contaminante aplicada no solo ou em subsuperfície” (FOSTER *et al.*, 1988). Muitas vezes, um aquífero pode configurar uma situação de alta vulnerabilidade, porém sem risco de poluição, pela ausência de carga poluidora significativa, ou vice-versa.

Foster *et al.* (1988) ainda nesta perspectiva enfatiza que todos os aquíferos são vulneráveis a médio ou a longo prazo a contaminantes que apresentam características persistentes e móveis, gerados por uma atividade amplamente distribuída em uma região. A carga poluidora pode ser controlada ou modificada, o mesmo não ocorre com a vulnerabilidade natural, que é uma propriedade intrínseca do aquífero. O mesmo autor reconhece também que “as águas subterrâneas

constituem uma reserva estratégica e vital para o abastecimento público e remete a uma especial preocupação com a proteção dos aquíferos.”

Necessita-se, portanto, de um sistema menos refinado e mais genérico para o mapeamento da vulnerabilidade do aquífero. Tendo em vista um objetivo mais prático, a solução por ora é produzir um mapa integrado da vulnerabilidade, desde que os termos usados estejam claramente definidos e as limitações precisamente descritas. (FOSTER e HIRATA, 1988).

O fluxo de água no subsolo e o transporte de contaminantes são processos intrincados. Na realidade, a interação entre os componentes da vulnerabilidade do aquífero à contaminação e a carga contaminante de subsolo que determina o perigo de contaminação da água subterrânea pode ser extremamente complexa. Em particular, o grau de atenuação do contaminante pode variar significativamente segundo o tipo de contaminante e de processo poluidor numa dada situação. (FOSTER e HIRATA, 1988).

Segundo a NRC (1993) toda água subterrânea é vulnerável, em maior ou menor grau, à contaminação; a incerteza é inerente a qualquer avaliação de vulnerabilidade à contaminação; os sistemas mais complexos de avaliação da vulnerabilidade apresentam o risco de obscurecer o óbvio e tornar indistintas as sutilezas.

Importante enfatizar conforme Auge (2004), a síntese de toda investigação sobre os recursos naturais é a sua representação cartográfica. Esta é uma importante aplicação para a hidrologia em geral e particularmente para a vulnerabilidade da água subterrânea. Os mapas de vulnerabilidade são denominados vulgarmente de semáforos, dado que a maioria utiliza as cores verde, amarelo e vermelho.

Os mapas à base de isolinhas, de acordo com Rodriguez e Ramos (1997) são utilizados pelo SIG e as fontes principais e potenciais de contaminação podem ser utilizadas na análise do ordenamento territorial, levando-se em conta a tendência de vulnerabilidade do aquífero, em casos, por exemplo, de expansão urbana.

Foster *et al* (2006) afirmam que é “preciso enfatizar que os mapas regionais de vulnerabilidade do aquífero à contaminação destinam-se a fornecer um instrumento que possa embasar as medidas para proteção da água subterrânea.” Trata-se, no

entanto, de duas coisas distintas, tanto em termos conceituais quanto funcionais. A primeira deve consistir numa representação simplificada, embora factual, dos melhores dados científicos disponíveis sobre o ambiente hidrogeológico.

Essa avaliação regional não elimina a necessidade de examinar em detalhes o quadro das atividades potencialmente poluentes antes decidirem às políticas de proteção. Os mapas de vulnerabilidade do aquífero visam fornecer uma primeira indicação dos riscos potenciais de contaminação da água subterrânea. Assim, os profissionais de regulação, planejamento e desenvolvimento territorial e ambiental estarão mais bem municiados para avaliar novas propostas de desenvolvimento e prioridades no controle da contaminação e no monitoramento da qualidade da água subterrânea.

Esses mapas, portanto, se baseiam nas melhores informações disponíveis à época em que foram produzidos. Na prática requer simplificação das variações geológicas e dos processos hidrogeológicos (naturalmente complexos). Ademais, questões específicas precisam ser respondidas por investigação de detalhe, mas geralmente é possível aplicar a mesma abordagem filosófica e metodológica aqui enunciada, a avaliação do perigo de contaminação da água subterrânea.

Os dados necessários para a avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação e para os cadastros de cargas contaminantes de subsolo devem, sempre que possível, ser desenvolvidos numa plataforma SIG adequada, a fim de facilitar a interação, a atualização e a apresentação dos resultados.

Foster *et al.* (2008) apresentam os fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação. Esses mesmos autores afirmam que para a inacessibilidade hidráulica, os dados normalmente disponíveis são o tipo de confinamento da água, a profundidade até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado enquanto que, para a capacidade de atenuação, os dados disponíveis são o grau de consolidação, fissuração e as características litológicas dos estratos presentes na zona vadosa.

As estratégias voltadas para o aquífero têm aplicações mais universais, já que buscam alcançar um grau de proteção para todo o manancial subterrâneo e todos os usuários desse manancial. O primeiro passo é mapear a vulnerabilidade do aquífero à

poluição nas áreas mais extensas incluindo um ou mais aquíferos importantes, trabalhando em uma escala adequada, se o interesse limitar-se a informações gerais e ao planejamento. O mapeamento normalmente é seguido de um cadastro da carga contaminante em escala mais detalhada, pelo menos nas áreas mais vulneráveis. (FOSTER *et al.*, 2006).

Hirata e Rebouças (2001) afirmam que a qualidade das águas subterrâneas deve passar por uma revisão de estratégias para proteger a qualidade das águas subterrâneas em vários países revela duas linhas básicas de ação, quase sempre independentes. Uma foca os perímetros das fontes de abastecimento, estabelecendo no entorno das captações (PPP), raios determinados a partir do tempo de trânsito, a distância da fonte, ou o comportamento hidráulico do aquífero. A outra linha é mais ampla, dirigida ao aquífero, e oferece um mapeamento de vulnerabilidade à poluição em correspondência com a importância social e econômica do recurso.

Após uma análise crítica para o estabelecimento das limitações e vantagens de cada um, concluem que uma estratégia a ser adotada permite a utilização conjunta dessas técnicas, sempre na perspectiva de uma aplicação dentro da realidade do continente latino-americano.

Interessante destacar que alguns aquíferos como os aquíferos norte-americanos, por exemplo, são agrupados em três categorias de vulnerabilidade, onde a definição de cada uma está associada com as características hidráulicas, a dificuldade de substituição por fontes alternativas e avaliando o desempenho das propriedades ecológicas vitais, como a manutenção de frágeis sistemas biológicos. (CANTER *et al.*, 1987).

Autores como Seller e Canter (1980), *Le Grand* (1983) e Carter *et al.* (1987) sugeriram que o desenvolvimento de vários mapas de vulnerabilidade de certos poluentes em forma de atlas. Embora esse trabalho possa ser caro, e de alguma forma dificultar a interpretação ambiental, os resultados são significativamente melhores do ponto de vista da ciência e da tecnologia. Outra abordagem seria a de desenvolver métodos para analisar apenas um tipo de poluente.

Auge (2004) analisa sinteticamente as vantagens e desvantagens dos principais métodos para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos. Salvo o método EPIK

(Vide p. 47) que é específico para aquíferos cársticos e o $\Delta hT'$ (Vide p. 54), para semiconfinados, os demais foram desenvolvidos especialmente para aquíferos granulares livres. O método DRASTIC (Vide p. 42) é mais robusto que o GOD (Vide p. 38), dado que emprega maior quantidade de variáveis (7), porém isso pode se transformar em um inconveniente quando não se dispõe dos valores de algumas delas. Também se critica o DRASTIC pela repetição do alcance de alguns parâmetros como R (recarga) e C (condutividade hidráulica), ambos vinculados a renovação de água no aquífero.

A obtenção de variáveis, vinculadas a litologia e aos solos, por meio de tabelas, produzem valores repetidos que associados aos efeitos dos fatores de ponderação, distorcem os índices de vulnerabilidade produzindo resultados semelhantes em áreas com o mesmo tipo de solo e de rocha.

O método SINTACS (Vide p. 45) é uma derivação do DRASTIC porque apresenta as mesmas vantagens e desvantagens que este, com o agravante de que sua operação requer o emprego de um software específico de SIG. Isto por um lado simplifica a entrada de novas informações que permite atualizar rapidamente a cartografia resultante, especialmente se aplicado em um programa. (AUGE, 2004).

Auge (2004) afirma que o método GOD possui como maior vantagem, a simplicidade de operação e o pequeno número de parâmetros requeridos para sua aplicação. Isto por sua vez resulta em definições menos claras que o DRASTIC e o SINTACS. Outro erro é não considerar a incidência do solo, que é um fator de grande relevância como protetor natural contra a contaminação. O uso de variáveis vinculadas a litologia determinadas por meio de tabelas, também produzem valores repetidos em áreas com o mesmo tipo de rocha.

À medida que aumenta a necessidade das informações básicas necessárias, se torna mais complexa a aplicação de metodologias como o DRASTIC e o SINTACS que requisitam 7 variáveis para sua aplicação, enquanto que o GOD requer 3 e o Ekv (Vide p. 36) apenas 2. Ocorre que quando se reduz o número de variáveis, se simplifica a avaliação, porém se perde em definição. (AUGE, 2004).

Auge (2004) enfatiza que, os métodos que utilizam menos valores paramétricos, como os métodos GOD e Ekv são mais práticos, enquanto que nos

estudos de detalhe se consegue uma melhor definição de vulnerabilidade com o DRASTIC ou o SINTACS. O EPIK é praticamente o único método disponível preparado especialmente para aquíferos Cársticos e este, é empregado sem considerações de escala.

Cada ambiente tem suas particularidades a grande complexidade hidrogeológica, que faz com que cada ambiente seja único, dificulta que métodos de cartografias de vulnerabilidade classifiquem os aquíferos de forma absoluta, ou seja, que cada unidade tenha significado sem a comparação com outras unidades. A grande maioria dos métodos existentes classifica os aquíferos de forma relativa. (HIRATA, 2001).

Segundo Auge (2004) ainda existem divergências em relação às representações cartográficas e, se a vulnerabilidade deve manter-se em termos qualitativos ou quantitativos. Neste sentido, durante o Congresso da Associação Internacional de Hidrogeologia - IAH realizado em Bratislava, em 1999, houve uma forte controvérsia entre as escolas Alemã e Checa. A primeira sustentava a necessidade de novas tecnologias para transformar a vulnerabilidade em uma variável quantitativa. A escola Checa propunha a manutenção do alcance qualitativo, devido ao inconveniente de se atribuir grandezas aos componentes e processos que incidem sobre a vulnerabilidade.

Assim, observa-se que o avanço no desenvolvimento de modelos numéricos e as vantagens que oferecem sistemas como o GIS, que permitem armazenar grande quantidade de informação e processá-las rapidamente, para a obtenção de produtos atualizados no espaço e no tempo, faz prever uma tendência a formulação de metodologias quantitativas no futuro. (AUGE, 2004).

2.1 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A atenção dos pesquisadores para a vulnerabilidade tem sido uma consequência da preocupação da sociedade com a degradação dos recursos hídricos subterrâneos. A cartografia de vulnerabilidade tem servido a racionalização de ações de proteção de aquíferos, na medida em que tenta compatibilizar as atividades

antrópicas com a capacidade do terreno em suportá-las, sem prejuízo à qualidade das águas subterrâneas.

A expressão vulnerabilidade dos aquíferos passou a ter diferentes significados para diferentes pessoas, e até hoje ainda se discute a definição e o alcance do termo vulnerabilidade dos aquíferos. A maioria dos autores a considera uma propriedade qualitativa, que indica o grau de proteção natural de um aquífero em relação à contaminação.

Faz-se referência ao que se conhece como vulnerabilidade intrínseca, aquela derivada de características próprias do aquífero e de seu entorno, sem considerar a ação dos contaminantes. Quando além das características do meio aquífero, se considera a incidência de contaminantes, a vulnerabilidade é denominada específica.

A controvérsia no congresso, da Associação Internacional dos Hidrogeólogos (AIH), em Bratislava, foi esquecida e prevaleceu a manutenção do alcance qualitativo para as metodologias do cálculo da vulnerabilidade.

Desde a década de 70, predominou a procura por um sistema qualitativo, mais genérico e menos refinado, de fácil aplicação, para o mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos com vistas a um objetivo considerado mais prático. Atualmente, os métodos tradicionais consagrados são utilizados por todos, sem que sejam questionadas suas funcionalidades.

A revisão permitiu compreender os fatores hidrogeológicos que controlam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, denominados de componentes de vulnerabilidade que são: a inacessibilidade hidráulica, a capacidade de atenuação e a diluição e remobilização dos elementos contaminantes na água e no solo.

Mapear a vulnerabilidade dos aquíferos em uma escala adequada, é primeiro passo na direção de uma gestão sustentável da água subterrânea e muito importante para produzir informações gerais para o planejamento do uso do território e da água. Este mapeamento deve ser seguido de um cadastro das cargas contaminantes com a finalidade de conhecer as zonas de risco para estabelecer medidas de proteção.

A revisão bibliográfica permite refletir e compreender o tema e os princípios usados internacionalmente na qualificação da vulnerabilidade. Igualmente forneceu os subsídios necessários para a proposição de um novo método, seguindo a tendência

da escola Alemã, no qual a vulnerabilidade seja determinada priorizando aspectos quantitativos sobre os qualitativos.

3 MÉTODOS PARA AVALIAR A VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

Aqui é apresentada uma classificação dos métodos para avaliar a vulnerabilidade, são citados os mais conhecidos, e por último, é feita a caracterização dos mais utilizados com uma breve análise de cada um deles.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS

“Encontra-se na bibliografia sobre o assunto, diversos métodos de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação”, segundo Foster *et al.* (2006), esses métodos podem ser classificados em três grupos principais, de acordo com a abordagem adotada por VRBA e Zaporozec (1994):

a) Ambientes hidrogeológicos: baseiam a avaliação da vulnerabilidade, em termos qualitativos, nas características gerais do ambiente, usando mapas temáticos. (ALBINET e MARGAT, 1970).

b) Modelos análogos: utilizam expressões matemáticas para os parâmetros essenciais, tais como tempo de trânsito médio na zona vadosa como indicadores do índice de vulnerabilidade. (MONKHOUSE, 1983).

c) Sistemas paramétricos: usam parâmetros selecionados como indicadores de vulnerabilidade e aplicam seu espectro de valores e interações para produzir alguma forma de índice de vulnerabilidade relativo ou absoluto. Incluem como exemplo desse método o DRASTIC de Aller *et al.* (1987); além da metodologia GOD.

Alguns desses sistemas incluem índices de vulnerabilidade formados por parâmetros hidrogeológicos, morfológicos e outras formas de parametrização das características dos aquíferos, de um modo bem definido. Observa-se, portanto, que existem numerosas metodologias para qualificar a vulnerabilidade e permitir seu mapeamento em diferentes escalas, em sua grande maioria, desenvolvidos para aquíferos livres.

3.2 MÉTODOS MAIS CONHECIDOS

Existem dezenas de métodos para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos em todo o mundo. Somente para ilustrar, aqui são apresentados os vinte métodos mais conhecidos, o objeto de sua avaliação, as variáveis utilizadas e suas respectivas referências (Tabela 2).

Tabela 2 - Métodos Mais Conhecidos

Nº	MÉTODO	AVALIA	VARIÁVEIS	REFERÊNCIA
01	$\Delta h.T'$	Vulnerabilidade em aquíferos semiconfinados	Potencial hidráulico e Transmissividade vertical	AUGE (2001), Argentina
02	IS	Vulnerabilidade geral	Profundidade da água, recarga, litologia, topografia e ocupação do solo	FRANCÉS <i>et al.</i> (2001) & PARALTA <i>et al.</i> (2001)
03	EPPNA	Vulnerabilidade geral	Características litológicas e hidrogeológicas	PLANO NAC.(PORT.) DA ÁGUA (1998)
04	EPIK	Vulnerabilidade em aquíferos	Carstificação superf., Cobertura de proteção, Infiltração e Rede cárstica	DOERFLIGER Y ZWAHLEM (1997)
05	EKv	Vulnerabilidade geral	Espessura da zona subsaturada e permeabilidade da zona subsaturada	AUGE (1995)
06	AVI	Vulnerabilidade geral	Espessura da camada acima do aquífero e condut. hidráulica	VAN STEMPVOORT (1993)
07	Saneamento em Situ	Vulnerabilidade a saneamento em situ	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, prof. e qualidade da água	FERREIRA & HIRATA(1993)
08	Sem nome	Vulnerabilidade geral	Característica litológica, permeabilidade e profundidade da água	ADAMS & FOSTER(1992)
09	SINTACS	Vulnerabilidade geral	Prof. da água, , tipo de solo, infiltração, aquífero, subsaturada, condutividade, topog.	CIVITA <i>et al.</i> (1990)
10	GOD	Vulnerabilidade geral	Tipo de aquífero, litologia da zona vadosa, prof. água	FOSTER & HIRATA (1988)
11	Sem nome	Vulnerabilidade geral/fluxo pistão	Condutividade, prof. água, umidade do solo e recarga real	MARCOLONGO & PRETTO (1987)
12	Potential Waste Sites (PWDS)	Disposição de resíduos sólidos	Vulnerabilidade, confinamento, prox. da fonte, tipo e quant. do cont.,veloc. zona. satur., percol.	BGS (Sem data)
13	Groundwater Vulnerability Map for Nitrate	Potencial de lixiviação de nitrato	Tipo de solo, caract. hidráulicas e litológicas do aquífero	CARTER <i>et al.</i> (1987)
14	DRASTIC	Vulnerabilidade geral	Prof. água, recarga, aquífero, solo topografia, impacto, condutividade hid.	ALLER <i>et al.</i> (1985)
15	Landfill Site Ranking	Aterros sanitários	Distancia aterro/poços, gradiente, permeabilidade e capacidade de atenuação	LE GRAND (1983)
16	Site Ranking Methodology	Disposição de resíduos sólidos e líquidos	Receptor, população, uso da água, prof. da água, degradação, caminhos,contam., pluv., perm. do solo, caract. do resíduo, manejo e aspect. oper. e construt.	KULFS <i>et al.</i> (1980)

Continua

Tabela 2 - Métodos Mais Conhecidos (Continuação)

17	Waste Soil Interation Matrix	Disposição de resíduos sólidos e líquidos	Efeitos na saúde, caract. e comport. do produto, capac. de atenuação do solo, hidrog.caract. do local	PHILIPS <i>et al.</i> (1977)
18	Poluição dos Lençóis Aquíferos	Vulnerabilidade geral	Geologia (litologia e estrutura)	TALTASSE (1972)
19	Site Ranking System	Disposição de produtos químicos	Solo, caract. hidrául, sorção e tamponam. químico, hidrodinâmica, ar, população	HARGERTY <i>et al.</i> (1973)
20	Surface Impoundment Assessment	Disposição de águas servidas	Zona não saturada, importância do rec., qualidade da água, periculosidade do material	LE GRAND (1964)

Fonte: (Modificado de HIRATA, R.C.A. (2001) apud NASCIMENTO, 2008).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MÉTODOS MAIS UTILIZADOS

Aqui são apresentados os principais métodos para avaliar a vulnerabilidade, suas equações, autores, parâmetros utilizados e em seguida, apresentado uma breve análise de cada um deles.

3.3.1 EPPNA

Este método foi proposto na Equipe de Projeto do Plano Português da Água, EPPNA (1998). De acordo com os autores, atribui-se uma classe de vulnerabilidade em função das características litológicas/hidrogeológicas de uma área (Tabela 3).

Tabela 3 - Classes de Vulnerabilidade do Método EPPNA

TIPOS LITOLÓGICOS	CLASSES DE VULNERABILIDADE
Rochas carbonatadas de elevada carstificação	Alta
Rochas carbonatadas de carstificação média a alta	Média a alta
Sedimentos não consolidados com a água superficial	Alta
Sedimentos não consolidados sem água superficial	Média
Rochas carbonatadas	Média a baixa
Rochas fissuradas	Baixa a variável
Sedimentos consolidados	Baixa
Inexistência de aquíferos	Muito Baixa

Fonte: EPPNA (1998)

A cartografia da vulnerabilidade à poluição segundo critérios litológicos foi realizada segundo o método apresentado no documento "Informação Cartográfica dos Planos de Bacia. Sistematização das Figuras e Cartas a Imprimir em Papel" de

autoria da Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água de Portugal, versão de Outubro de 1998.

Esta abordagem apresenta algumas vantagens em relação aos métodos empíricos, uma vez que permite incorporar o conhecimento de inúmeras variáveis hidrogeológicas e do comportamento das principais formações para gerar classes de vulnerabilidade correspondentes a um determinado nível de risco.

3.3.2 E Kv

Este método foi desenvolvido por Auge (1995) que considera a vulnerabilidade, “um conceito qualitativo que geralmente se refere ao grau de proteção natural de um aquífero diante da contaminação. Por isso também é conhecida como proteção ou defesa natural”. Trata-se de uma classificação para os aquíferos livres baseada na profundidade de superfície freática (E) e na permeabilidade vertical da zona subsaturada (Kv). **Índice = E.Kv**

Aos dois parâmetros se atribuem índices que vão de 1 (menos vulnerável) a 5 (mais vulnerável) (Tabelas 4 e 5).

Tabela 4 - Índices de Vulnerabilidade da Profundidade da Superfície Freática no E.Kv

Espessura da Zona Subsaturada (E)					
metro	>30	>10 a 30	>5 a 10	>2 a 5	<2
Índice	1	2	3	4	5

Fonte: Auge (1995)

Tabela 5 - Índices de Vulnerabilidade da Zona Subsaturada

Permeabilidade da Zona Subsaturada (Kv)					
metro/dia	<1.10 ⁻³	>1.10 ⁻³ a 0,01	>0,01 a 1	>1 a 50	>50 a 500
Índice	1	2	3	4	5
Vulnerabilidade	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta

Fonte: Auge (1995).

Esses valores são aplicados no diagrama abaixo, onde K_v é a permeabilidade vertical e E é a espessura da seção subsaturada. Ambos os valores se somam fornecendo um índice final, com extremos de 2 até 10. Para um índice de $E + K_v$ entre 2 e 4 a vulnerabilidade é baixa, entre 5 e 7 é média e de 8 a 10 é alta (Tabela 6).

Permeabilidades verticais:

- 5: (K_v) de 50 a 500 metro/dia, para areia média e grossa, cascalho arenoso e cascalho.
- 4: K_v de 1 a 50 metro/dia, para areia muito fina a siltosa, areia fina e areia média a grossa.
- 3: K_v de 0,01 a 1 metro/dia, para silte e silte arenoso.
- 2: K_v de 0,001 a 0,01 metro/dia, para silte e silte argiloso.
- 1: $K_v <$ de 0,001 metro/dia, para argila e argila siltosa.

Tabela 6 - Diagrama da Vulnerabilidade de Aquíferos Livres

K_v	1	6	5	4	3	2
	2	7	6	5	4	3
	3	8	7	6	5	4
	4	9	8	7	6	5
	5	10	9	8	7	6
		5	4	3	2	1
	E					

Fonte: Auge (1995)

Baseada em apenas duas variáveis, ambas relacionadas à acessibilidade de contaminantes ao aquífero, com baixos efeitos de proteção, pois apenas retardam a sua chegada ao aquífero.

A profundidade da superfície freática (E), variável de fácil obtenção utilizada em quase todos os métodos e a permeabilidade vertical da zona saturada (Kv), obtida a partir das características litológicas por meio de tabela.

É um método simples e de fácil aplicação, porém só considera 2 parâmetros, profundidade do lençol freático e permeabilidade vertical da seção saturada. Considerando que a vulnerabilidade de um aquífero granular livre é, por natureza, bastante complexa, o método deixa de considerar outras variáveis que imprimem importantes efeitos de proteção.

3.3.3 GOD

Foi o método proposto por Foster (1987) e se baseia na atribuição de índices entre 0 e 1 a 3 variáveis, cujas iniciais deram o nome ao mesmo e significam: G (*ground water occurrence* – tipo de aquífero), O (*overall aquifer class* – litologia da cobertura), D (*depth* – profundidade da água). Exceto a profundidade da água que é medida, as outras variáveis são relacionadas com tipos litológicos e determinadas por meio de tabelas. **Índice GOD = G. O. D**

Devido à simplicidade, a sua aplicação é indicada para trabalhos semi-regionais, escalas 1:100.000 a 1:500.000 e regionais, menores que 1:500.000, que normalmente são realizados com a finalidade de planejar a preservação e o uso adequado dos recursos naturais, em regiões relativamente extensas que envolvem milhares de km².

O diagrama abaixo reproduzido por Foster e Hirata (1991), mostra os procedimentos para qualificar a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação. Os 3 índices que, multiplicados entre si, apresentam um único resultado final. No diagrama de saída, a vulnerabilidade pode variar de 1, vulnerabilidade máxima, e 0 a mínima (Figura 1).

Sua maior vantagem, segundo Auge (2004) sua maior vantagem é a simplicidade de operação e o pequeno número de parâmetros requeridos para sua aplicação, que resulta em definições menos claras que o DRASTIC e o SINTACS. O fato de não considerar a incidência do solo, um fator de grande relevância como filtro natural para a contaminação, torna o método pouco eficiente.

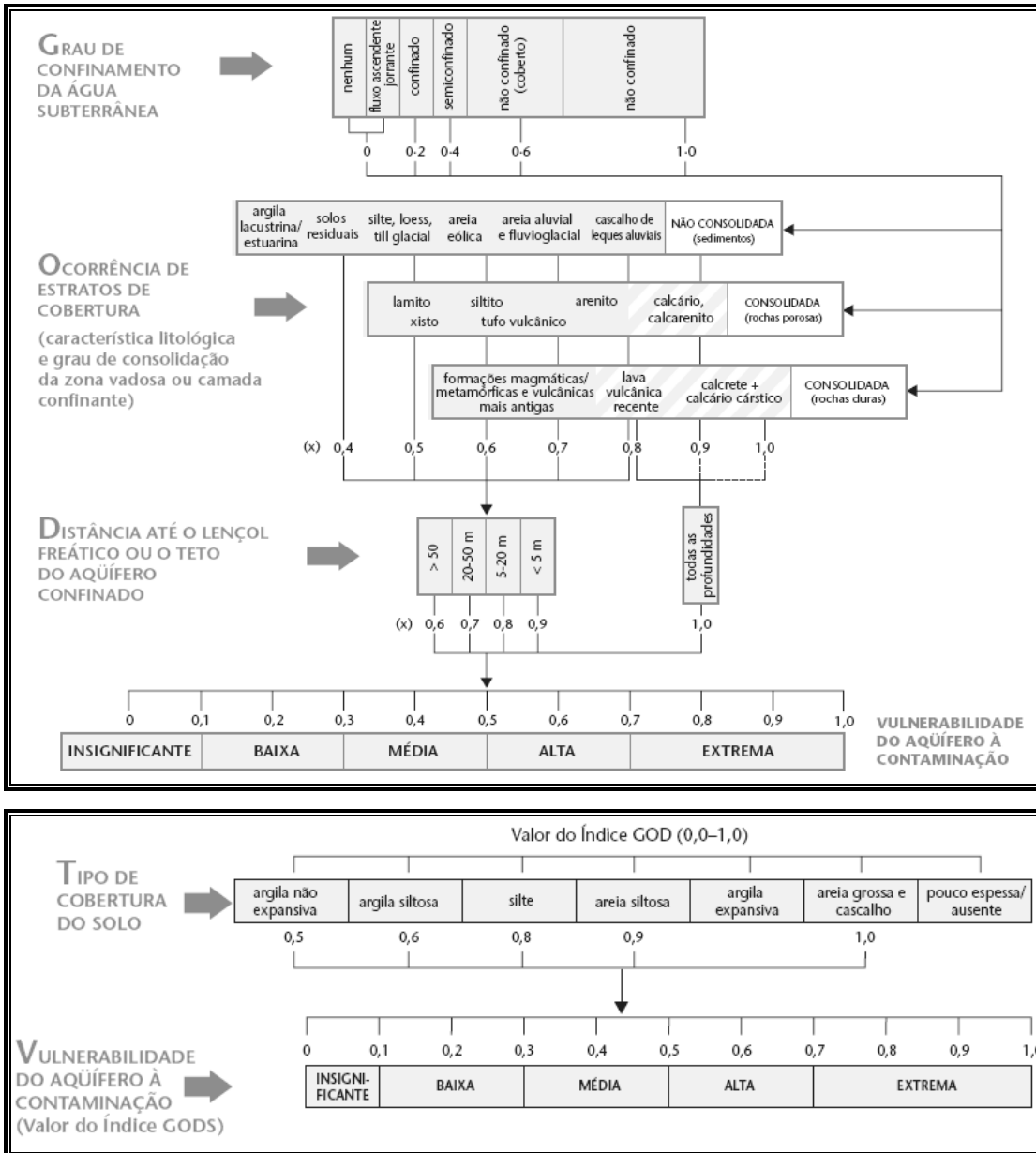


Figura 1 - Diagrama para aplicação do GOD

Fonte: Foster & Hirata (1991).

A confecção dos mapas com índices de vulnerabilidade GOD segue os procedimentos adotados abaixo. Isso pode ser feito manualmente traçando-se o contorno de cada um dos três fatores e sobrepondo-os em um mapa final ou por meio de outra opção, cada vez mais utilizada, a tecnologia do SIG (Sistema de Informações Geográficas) (Figura 2).

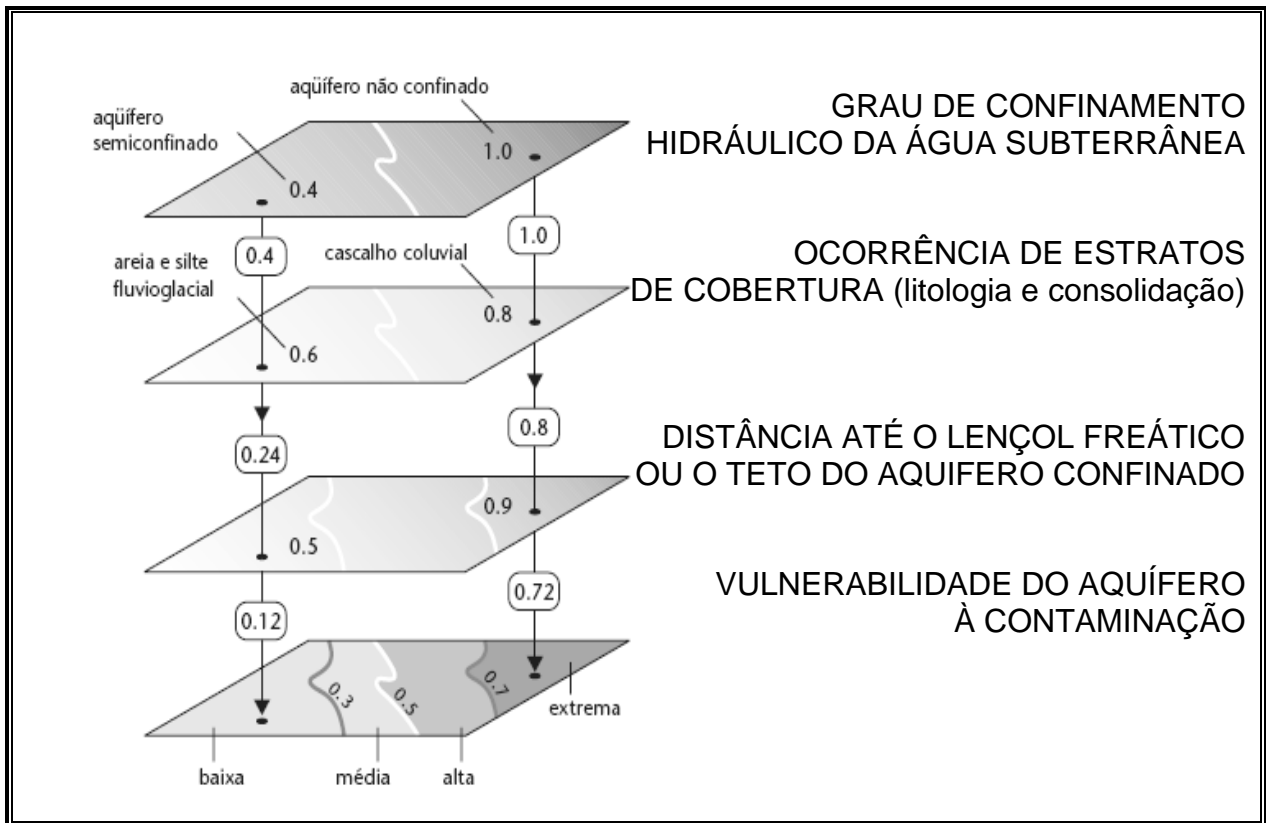


Figura 2 - Procedimentos adotados na determinação do índice GOD

Fonte: Foster et al. (2006).

Foster et al. (2006) enfatiza que, na maioria dos casos, dispõe-se de mapas hidrogeológicos e/ou estudos de recursos hídricos subterrâneos, os quais geralmente contêm os dados básicos necessários. No entanto, com freqüência é necessário suplementar essas informações com mapas geológicos, registros de perfuração de poços e, às vezes, com inspeção de campo.

Os princípios do método estão baseados em dois fatores hidrogeológicos de proteção do aquífero, a acessibilidade hidráulica a zona saturada e a capacidade de atenuação da zona não saturada. Somente o método GOD contempla parcialmente o tipo de aquífero em relação a seu comportamento hidráulico e o grau de consolidação. É um dos métodos mais práticos de ser aplicados porque requer poucos valores paramétricos.

O método GOD de avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação foi amplamente avaliado na América Latina e no Caribe durante a década de 1990 e, graças a sua simplicidade conceitual e de aplicação, é o método preferido dentre os

aqui descritos. Para determinar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação, são considerados dois fatores básicos: o nível de inacessibilidade hidráulica da zona saturada do aquífero e a capacidade de atenuação dos estratos de cobertura da porção saturada do aquífero.

Esses fatores, no entanto, não podem ser medidos diretamente e dependem, por sua vez, da combinação de outros parâmetros. Uma vez que geralmente não se dispõe de dados sobre muitos desses parâmetros, a simplificação da lista é uma medida inevitável se o objetivo é desenvolver um esquema de mapeamento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

O órgão de recursos hídricos do Vale de Cauca, no Chile, fez um mapeamento da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação utilizando o método GOD. Foi introduzida uma modificação, sugerida originalmente pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Pontifícia Universidade Católica do Chile, que incorporava um fator S relativo à capacidade da cobertura do solo de atenuação dos contaminantes. (AUGE, 2004).

Auge (2004) também traz as seguintes considerações sobre a metodologia modificada, conhecida como GODS que consiste em atribuir os valores de S de acordo com as características da textura do solo, que varia de muito fina, predominantemente argilosa, a muito grossa, à maneira de cascalhos, apresentando áreas com mais de meio metro de espessura.

A Agência Ambiental da Inglaterra e do País de Gales, também incluiu um fator de solo em seu mapeamento da vulnerabilidade do aquífero. Este se baseia num conjunto de propriedades do solo que determinam a suscetibilidade à lixiviação, mas seu efeito limita-se a reduzir potencialmente o nível da vulnerabilidade mapeada nas zonas rurais, e não é considerado funcional nas áreas urbanas – onde a alteração dos perfis do solo provocada por obras de engenharia está em toda parte. (FOSTER, 1987).

Este método possui como maior vantagem, a simplicidade de operação e o pequeno número de parâmetros requeridos para sua aplicação. Isto por sua vez resulta em definições menos claras que o DRASTIC e o SINTACS. Outro erro é não

considerar a incidência do solo, que é um fator de grande relevância como filtro natural para a contaminação. (AUGE, 2004).

3.3.4 DRASTIC

Foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987) para a EPA (U.S. *Environmental Protection Agency*) com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos. Trata-se de um método tradicional bastante utilizado, tanto para a qualificação (avaliação qualitativa) como para o mapeamento.

Se baseia na atribuição de índices que vão de 1 a 10, de acordo com as características e o comportamento das variáveis consideradas nas iniciais que compõem o nome DRASTIC – D (*depth* - profundidade do nível freático), R (*recharge* - recarga), A (*aquifer* - litologia do aquífero), S (*soil* - tipo de solo), T (*topography* - topografia), I (*impact* - litologia da seção subsaturada), C (*hydraulic conductivity* - condutividade hidráulica do aquífero). O índice 1 indica a vulnerabilidade mínima e 10, a máxima.

Além disso, o método determina que, para cada variável se deve atribuir um peso ou ponderação de acordo com a sua influência sobre a vulnerabilidade. Para definir este peso se utilizam índices que variam de 1 a 5. Os autores adotam um valor maior (5), para a profundidade da água (D) e a litologia da seção subsaturada (I). O valor menor (1) é recomendado para a topografia (T).

Segundo Auge (2003), o método DRASTIC tem o uso difundido para a avaliação qualitativa e para o mapeamento da vulnerabilidade de uma região. Baseia-se no estabelecimento de índices de acordo com as características e o comportamento das variáveis consideradas.

O DRASTIC foi desenvolvido para avaliar áreas maiores do que 0,4 km² (LEITE e MOBUS, 1998), e busca sistematizar o potencial dos contaminantes de alcançar a zona saturada (AGÜERO VALVERDE e MESALLES, 2000).

Para obtenção do índice de vulnerabilidade e classificação dos parâmetros e suas ponderações, o método DRASTIC propõe a aplicação das variáveis descritas na Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis Utilizadas no Método DRASTIC

D	Profundidade	Profundidade do nível freático
R	Recarga	Taxa de recarga do aquífero
A	Aquífero	Tipo de aquífero
S	Solo	Tipo de solo
T	Topografia	Topografia do terreno, declividade
I	Impacto	Impacto na zona não saturada
C	Condutividade	Condutividade hidráulica

Fonte: Aller *et al.* (1987)

Este método determina que, para cada variável se deve atribuir um peso ou fator de ponderação definido de acordo com a sua influência sobre a vulnerabilidade. Para definir os índices se utilizam pesos que variam de 1 a 5 multiplicados pelas variáveis. Os fatores de ponderação estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Fatores de Ponderação do Método DRASTIC

PARÂMETROS	DRASTIC
Dw – Profundidade do nível estático	5
Rw – Recarga do aquífero	4
Aw – Material do aquífero	3
Sw – Tipo de solo	2
Tw – Topografia	1
Iw – Impacto da zona não saturada	5
Cw – Condutividade hidráulica	3

Fonte: Aller *et al.* (1987)

Os valores das variáveis são multiplicados pelos pesos e em seguida, são somados os sete resultados para obter-se o valor do índice de vulnerabilidade, cujos extremos são 23 (mínimo) e 230 (máximo), ainda que na prática o índice dominante varie de 50 a 200.

É o mais conhecido entre os métodos paramétricos que avalia a vulnerabilidade de forma qualitativa pela soma dos índices ponderados para sete variáveis, determinadas com o auxílio da tabela. É mais robusto que o GOD, dado que emprega maior quantidade de variáveis (7), porém isso pode se transformar em um inconveniente quando não se dispõe dos valores de algumas delas (Tabela 9).

Também se critica o DRASTIC pela repetição do alcance de alguns parâmetros como R e C, ambos vinculados a renovação de água no aquífero, e a pouca incidência que tem sobre outros aspectos relacionados à vulnerabilidade como o Solo (S).

Os efeitos superpostos das variáveis, impacto da zona não saturada (I), natureza do aquífero (A) e tipo de solo (S), vinculadas ao tipo litológico, produzem uma tendência a equalizar os índices de vulnerabilidade determinados em locais com o mesmo tipo de rocha, produzindo índices repetidos ou com valores muito próximos.

O método foi objeto de várias avaliações (HOLDEN *et al.*, 1992; BATES *et al.*, 1993; KALINSKI *et al.*, 1994; ROSEN, 1994). Todas elas revelaram os diversos benefícios e as inúmeras deficiências dessa metodologia. Considera-se que o método tende a gerar um índice de vulnerabilidade vago devido à interação de um excesso de parâmetros ponderados, alguns dos quais apresentam forte correlação e sobreposição. O fato é que se podem obter índices similares por uma combinação diferente de situações hidrogeológicas que pode ocasionar riscos na tomada de decisão, BANCO MUNDIAL (2006).

A recarga (R) é considerada uma variável com relação direta com a vulnerabilidade por todos os métodos. Quanto maior a recarga, maior a vulnerabilidade. Trata-se de uma variável que produz tanto efeitos de proteção como de vulnerabilidade nas equações. Os autores do DRASTIC, como os dos demais métodos, também consideram somente o efeito negativo de transportar o contaminante para o aquífero, desconsiderando os efeitos positivos localizados, tais como a diluição dos contaminantes solúveis e a retirada dos mesmos do ambiente aquífero por meio do fluxo subterrâneo, bem como o notável efeito de proteção que ocorre nas áreas de exudação do aquífero, onde os fluxos ascendentes nas zonas de descarga impedem a penetração de contaminantes no aquífero.

As variáveis - Natureza do Aquífero, Impacto da Zona não Saturada e Natureza do Solo - estão direta ou indiretamente vinculadas a litologia do aquífero, por ser o solo derivado das rochas. Isso faz com que em um aquífero constituído por um mesmo tipo de rocha, os valores dessas variáveis, determinados por meio de tabelas,

sejam repetidos e apresentem uma tendência de produzir índices de vulnerabilidade com valores muito próximos ou mesmo iguais:

ÍNDICE DRASTIC = Dr.Dw + Rr.Rw + Ar.Aw + Sr.Sw + Tr.Tw + Ir.Iw + Cr.Cw,
onde **w**, representa os parâmetros de ponderação do método e o **r** subscrito na equação representa o valor das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência determinados na tabela 9.

3.3.5 SINTACS

É uma adaptação do método DRASTIC elaborado por Civita *et al.* (1990) para adaptá-lo às diversas características hidrológicas da Itália e às necessidades de um mapeamento com maiores detalhes. O nome SINTACS significa – S (*Soggiacenza*), profundidade da água, I (*Infiltrazione*), infiltração, N (*Non saturo*), seção subsaturada, T (*Tipologia della copertura*), tipo de solo, A (*Acquifero*), características hidrológicas do aquífero, C (*Conducibilità*), condutividade hidráulica, S (*Pendente topográfica*), superfície topográfica, cujo é calculado com a seguinte fórmula:

$$\text{Índice Sintacs} = S.22 + I.8 + N.12 + T.9,8 + A.17,7 + C.18,6 + S.11,9$$

A seguir são indicados os pesos relativos em % das variáveis intrínsecas, adaptadas para a região de *La Loggia-Carignano* por VRBA e Zaporozec (1994). O peso de maior importância em relação a vulnerabilidade é S, a profundidade da superfície freática (22) e o peso menor, é a recarga I (8) (Figura 3).

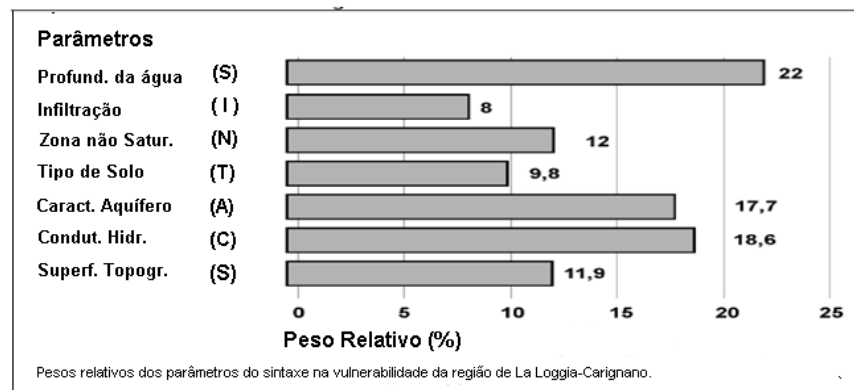


Figura 3 - Pesos Relativos das Variáveis do SINTACS
Fonte: Civita *et al.* (1990) *apud* VRBA & Zaporozec (1994)

Tabela 9 - Intervalos das Variáveis e Valores Utilizados no Método DRASTIC

(D) PROFUNDIDADE DO NÍVEL PIEZOMÉTRICO		(R) RECARGA LÍQUIDA		
INTERVALO DOS VALORES (m)	VALOR	INTERVALO DOS VALORES (mm)		VALOR
<1,5	10	0-50		1
1,5 - 5,0	9	50-100		3
5,0-10,0	7	100-180		6
10,0-20,0	5	180-255		8
20,0-30,0	2	>255		9
>30,0	1			
(A) NATUREZA DO AQUÍFERO		(S) NATUREZA DO SOLO		
DESCRIÇÃO	INTERV.	VALOR	TIPO DE SOLO	VALOR
A- Argilas, margas e siltes	1,0-3,0	2	Argila não expansiva agregada	1
B- Ígneas / metamórficas	2,0-5,0	3	Solo orgânico	2
C- Ígneas / metamórficas alteradas	3,0-5,0	4	Marga argilosa	3
D- Intercalações de arenitos, argilas e calcários	5,0-9,0	6	Marga siltosa	4
E- Arenitos Maciços	4,0-9,0	6	Marga	5
F- Calcários Maciços	4,0-9,0	6	Marga arenosa	6
G- Areias cascalhos e conglomerados	4,0-9,0	8	Argila expansiva e agregada	7
H- Vulcânicas	2,0-10,0	9	Turfa	8
I - Calcários carstificados	9,0-10,0	10	Areia	9
			Cascalhos	10
			Delgado ou ausente	10
(T) TOPOGRAFIA		(C) PERMEABILIDADE		
INTERVALO DE VALORES (%)	VALOR	INTERVALO DE VALORES (m/dia)		VALOR
0- 2,0	10	<4,0		1
2,0- 6,0	9	4,0-12,0		2
6,0- 12,0	5	12,0-28,0		4
12,0-18,0	3	28,0-40,0		6
>18,0	1	40,0-80,0		8
		>80		10
(I) IMPACTO DA ZONA NÃO SATURADA				
DESCRIÇÃO		INTERVALO DE VALORES		VALOR
A- Argila, silte, margas		1,0-2,0		1
B- Xistos e Ardósias		2,0-5,0		3
C- Calcários		2,0-7,0		6
D- Arenitos		4,0-8,0		6
E- Intercalações de calcários, arenitos e argilas		4,0-8,0		6
F- Areias e cascalhos com matriz argilosa		4,0-8,0		6
G- Metamórficas e ígneas		2,0-8,0		4
H- Areias e cascalhos		6,0-9,0		8
I- Vulcânicas		2,0-10,0		9
J- Calcários carstificados		8,0-10,0		10

Fonte: Aller et al. (1987) apud Moptama (1994)

É uma derivação do DRASTIC porque apresenta as mesmas vantagens e desvantagens que este, com o agravante de que sua operação requer o emprego de um software específico. Isto por um lado simplifica a entrada de novas informações (oscilação do lençol freático), o que permite atualizar rapidamente a cartografia resultante, especialmente se aplicado em um programa SIG. Por outro lado, a falta do software limita o uso do método.

Este método apresenta uma estrutura complexa, tanto para a entrada de dados como para a saída, visto que sua operação se realiza mediante um programa de computador preparado especialmente para o mesmo. Às variáveis mencionadas que influenciam na vulnerabilidade intrínseca, podem ser adicionadas a ocorrência da água superficial e ao uso da terra.

3.3.6 EPIK

É um método paramétrico desenvolvido por Doerfliger e Zwahlen (1997) para aquíferos cársticos. O seu nome deriva de: *Epikarst (E)*, *Protective cover (P)*, *Infiltration conditions (I)*, *Karst network development (K)*, que são as quatro características relacionadas ao fluxo e ao transporte nos sistemas cársticos.

Epikarst (E) é uma zona de intensa carstificação com elevada permeabilidade, próxima a superfície (TRIPET *et al.*, 1997), à qual se atribui 3 valores: E₁ – correspondente a uma rede cárstica típica (dolinas, depressões, cavidades, grutas); E₂ – quando apresenta superfícies frágeis na zona superficial que geram alinhamentos (vales secos, alinhamentos de dolinas) e E₃ – ausência de morfologia cárstica.

A Cobertura de Proteção (P) é formada pelo solo e outros materiais de cobertura como depósitos glaciais, siltes, argilas aluviais, leques aluviais, etc. A este parâmetro se atribuem 4 valores (de P₁ a P₄), em função da espessura da cobertura.

O parâmetro condições de infiltração (I) é o mais complexo de ser estimado. (I)₁ se aplica a regiões com vias acessíveis a infiltração direta. (I)₂ e (I)₃ se empregam em zonas com declividades entre 0 a 25%. Contrariamente a outros métodos

paramétricos, neste a vulnerabilidade aumenta com o incremento nos locais mais carstificados.

Ao parâmetro rede cárstica (K) se atribui 3 valores: K_1 para uma rede cárstica bem desenvolvida; K_2 para zonas pobremente carstificadas e K_3 para aquíferos cársticos com descarga em meios porosos, ou que apresentem fraturamento subordinado (Tabela 10).

Tabela 10 - Valores dos Parâmetros para o EPIK

E_1	E_2	E_3	P_1	P_2	P_3	P_4	I_1	I_2	I_3	I_4	K_1	K_2	K_3
1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

Fonte: Doerfliger & Zwahlen (1997)

A diferença da maioria dos outros métodos, é que o EPIK fornece vulnerabilidades crescentes, à medida que diminuem os valores relativos dos parâmetros considerados. Isto é, o método aponta mais para a definição do fator de proteção da água subterrânea, do que para vulnerabilidade. Para os fatores de ponderação, Doerfliger e Zwahlem (1997) propõem: $\alpha = 3$, $\beta = 1$, $\gamma = 3$ e $\delta = 2$.

Considerando os valores relativos e os fatores de ponderação, tem-se que o índice de vulnerabilidade ou fator de proteção de um aquífero em meio cárstico pode variar entre extremos de 9 (mais vulnerável), até 34 (menos vulnerável). Os mesmos autores recomendam empregar as seguintes categorias:

- Vulnerabilidade alta (9-19);
- Vulnerabilidade média (20-25);
- Vulnerabilidade baixa (26-34);
- Vulnerabilidade muito baixa, quando existe uma cobertura de solo detrítico, com pelo menos 8 metros de espessura e baixa condutividade hidráulica.

O método EPIK apresenta o atributo favorável de ser o único desenvolvido especificamente para aquíferos cársticos e como maior desvantagem de ser indefinido em alguns parâmetros como K e I. Considerando que é praticamente o

único método disponível desenvolvido especialmente para aquíferos cársticos, este é empregado sem considerações de escala.

O método também inclui 4 fatores de ponderação (α , β , γ , δ), aplicados a cada parâmetro (EPIK), para avaliação de seu peso relativo no cálculo do índice de vulnerabilidade intrínseca. Este índice de vulnerabilidade, também denominado de fator de proteção, é:

$V_i = (\alpha.E_i) + (\beta.P_i) + (\gamma.I_i) + (\delta.K_i)$, sendo V_i – índice de vulnerabilidade na área i e E_i , P_i , I_i , K_i são os valores relativos aos parâmetros E , P , I e K , cujos valores dos parâmetros encontram-se abaixo (Tabela 10).

O método inova com uma variável importante que é a cobertura de proteção, constituída pelo solo e por outros materiais tais como: depósitos glaciais, siltes, argilas aluviais, leques aluviais. A este parâmetro se atribuem valores em função de sua espessura.

Os valores dos índices das variáveis usadas no EPIK (E) zona carstificada próxima à superfície e (K), desenvolvimento da rede cárstica, são determinados com muita subjetividade. Somando a isso, a complexidade da estimativa da infiltração (I), torna o método pouco preciso. Apesar de ser o único método desenvolvido exclusivamente para aquíferos Cársticos.

3.3.7 AVI

O método AVI (Índice de Vulnerabilidade do Aquífero) foi desenvolvido pelo *National Hydrology Research Institute* (NHRI), do Canadá. Este método foi proposto por Van Stempvoort et al. (1993) com base unicamente em dois parâmetros: a espessura de cada camada sedimentar acima da zona saturada (d_i) e a condutividade hidráulica estimada de cada uma destas camadas (K_i). O índice AVI representa a resistência de um aquífero ao fluxo vertical, em unidades [T] e significa o tempo aproximado da passagem de um poluente através das diferentes camadas.

A partir desses parâmetros calcula-se a Resistência Hidráulica: $C = \sum (d_i / K_i)$. A relação entre a vulnerabilidade e C é apresentada abaixo (Tabela 11).

Tabela 11 - Classes de Vulnerabilidade do Método AVI

RESISTÊNCIA HIDRÁULICA (ANO)	VULNERABILIDADE
0 - 10	Extremamente Alta
10 - 100	Alta
100 – 1.000	Moderada
1.000 – 10.000	Baixa
> 10.000	Extremamente Baixa

Fonte: Van Sempvoort *et al.* (1992)

É indicado para sistemas multicamadas, composto por sucessivos aquíferos, mas pode, por simplificação, ser aplicado a um sistema freático, admitindo apenas uma camada, a espessura da zona vadosa. É um método desenvolvido para um tipo específico de aquífero que avalia a vulnerabilidade de um aquífero com a estimativa de apenas duas variáveis: a espessura das camadas sobre a zona saturada e a suas condutividades hidráulicas. O índice expressa a resistência hidráulica em tempo, resultado da divisão do somatório das espessuras (m) pelo somatório da condutividade hidráulica estimada (m/ano).

3.3.8 IS

O Índice de Susceptibilidade (IS) foi desenvolvido por Francés *et al.* (2001) com o propósito de caracterizar a vulnerabilidade específica das águas subterrâneas à poluição agrícola. O Índice é constituído pela soma ponderada dos parâmetros, sendo que os primeiros quatro parâmetros (D, R, A e T) são extraídos diretamente do método DRASTIC que lhe deu origem com a substituição dos índices (I) e (C) por Ocupação do Solo (LU).

É calculado a partir da soma ponderada de 5 parâmetros: (1) D – profundidade do topo do aquífero (2) R – recarga anual (3) A – litologia do aquífero (4) T – topografia, e (5) LU – ocupação do solo. A cada parâmetro é atribuído um índice que é multiplicado por um peso.

Os pesos atribuídos a cada parâmetro foram modificados em relação ao método DRASTIC depois da consulta de técnicos e especialistas em Hidrogeologia. (Tabela 12).

Tabela 12 - Parâmetros e Ponderadores do Método IS

PARÂMETRO	D	R	A	T	LU
Ponderador	86	12	5	2	22

Fonte: Frances e Peralta *et al.* (2001)

Os índices de Susceptibilidade variam de 0 a 100% com as respectivas classes de vulnerabilidade observadas abaixo (Tabela 13). (PARALTA *et al.*, 2001).

Tabela 13 - Classes de Vulnerabilidade do Método IS

ÍNDICE	IS %	CLASSES DE VULNERABILIDADE
85 - 100		Muito Alta
65 - 85		Alta
45 - 65		Intermediária
0 - 45		Baixa

Fonte: Frances e Peralta *et al.* (2001)

A ocupação do solo (LU) foi a variável que deu notoriedade ao método, porém é mais um indicador das fontes potenciais de contaminação do que uma característica intrínseca do aquífero para sua proteção. Trata-se de um parâmetro que varia no espaço e no tempo, sem considerar a dinâmica dos processos na agricultura. A idéia é que o produto final do mapeamento da vulnerabilidade seja utilizado para receber os dados das fontes de contaminação para que sejam estabelecidas as normas de proteção do aquífero.

Os fatores de ponderação são todos menores que a unidade que promove na prática a redução da vulnerabilidade, aliás, esse fato é verdadeiro para todas as variáveis do método, sendo que para cada uma delas reduz de forma diferente com base na importância atribuída.

A principal alteração no Índice de Susceptibilidade é o acréscimo de um parâmetro de ocupação do solo (LU) baseado unicamente nas condições naturais. O IS foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade específica, definida

segundo VRBA e Zaporozec (1994) pelos impactos potenciais do uso específico dos solos e dos contaminantes associados a esse uso.

O método foi aplicado em Portugal e os parâmetros, seus significados, fontes de informação e respectivos fatores de ponderação são apresentados na Tabela 14, conforme Frances *et al* (2001).

Tabela 14 - Parâmetros e Fatores de Ponderação do Índice de Susceptibilidade em Portugal

Parâmetro	Significado	Fonte de Informação	Fatores de Ponderação
D	Profundidade do lençol freático	Dir. Reg. do Amb. e do Orden. do Território.	0,186
R	Recarga anual dos aquíferos	Almeida (1985), Silva (1988)	0,212
A	Geologia do aquífero	Carta Geológica de Portugal	0,259
T	Declividade do terreno	Comissão de Coordenação do	0,121
LU	Uso do solo	Carta Corine Land Cover,	0,222

Fonte: Frances *et al.*(2001)

Índice de Susceptibilidade = D x (0,186)+R x (0,212)+A x (0,25)+T x (0,12)+LU x (0,222)

Divide-se o uso do solo por classes, conforme a classificação da carta CORINE Land Cover (CNIG, 1988). A seguir faz-se um resumo da descrição dos parâmetros e a justificativa da sua seleção, com base na descrição realizada por Francés *et al.* (2001) (Tabela 15).

Tabela 15 - Classes e Valores Atribuídos aos Parâmetros do Índice de Susceptibilidade

D (M)		R (MM/ANO)		A		T (%)	
Classe	Valor *	Classe	Valor *	Classe	Valor**	Classe	Valor *
< 1,5	100	< 51	10	Xisto argiloso, argilito	10–30 (20)	< 2	100
1,5–4,6	90	51-102	30	Metamórfica/ígne	20–50 (30)	2–6	90
4,6–9,1	70	102-178	60	Metamórfica/ígne alterada	30–50 (40)	6-12	50
9,1–15,2	50	178-254	80	“Till” glacial	40–60 (50)	12–18	30
15,2–22,9	30	> 254	90	Arenito, calcário e argilito interc.	50–90 (60)	>18	10
22,9–30,5	20			Arenito maciço	40–90 (60)		
> 30,5	10			Calcário maciço	40–90 (80)		
				Areia e basalto	40–90 (80)		
				Basalto	20–100 (90)		
				Calcário estratificado	90–100 (100)		
* Diz respeito ao centro de cada classe, sendo os restantes valores interpolados através de uma função polinomial							
** Entre parênteses o valor típico							

Fonte: Frances et al. (2001)

A ocupação do solo (LU) envolve as atividades exercidas no terreno, que constituem as potenciais fontes de contaminação dos aquíferos. As descargas industriais e as zonas de espalhamento de lixo são consideradas as mais poluentes, enquanto que à agricultura irrigada também é atribuída um índice de contaminação elevado. Por outro lado, as florestas, os meios semi-naturais e as superfícies com água não contribuem de modo algum na poluição dos aquíferos e são, portanto, classificados com valor 0.

3.3.9 DRASTIC PESTICIDE

Este também é um método derivado do DRASTIC no qual foram modificados os fatores de ponderação atribuídos aos parâmetros do método que lhe deu origem levando em conta os processos de atenuação dos pesticidas nos solos e na zona

vadosa (ALLER *et al.*, 1987). A ponderação do *DRASTIC Pesticide* é apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Parâmetros e Ponderadores do Método DRASTIC PESTICIDE

PARÂMETRO	D	R	A	S	T	I	C
PONDERADOR	5	4	3	5	3	4	2

Fonte: Aller et al. (1987)

É mais uma modificação do método DRASTIC, com as mesmas variáveis, os mesmos erros e acertos do método original, apenas com os índices ponderadores diferentes para realçar os efeitos de proteção do aquífero a pesticidas.

As variáveis utilizadas são praticamente as mesmas do DRASTIC, exceto a recarga (R) que foi substituída pela infiltração (I); ambas avaliam o aporte de água ao aquífero. Foram modificados os pesos ou fatores de ponderação, com maior destaque para a variável profundidade da água (S), condutividade hidráulica (C) e características do aquífero (A).

$$\text{Índice DRASTIC PESTICIDE} = D.5 + R.4 + A.3 + S.5 + T.3 + I.4 + C.2$$

3.3.10 $\Delta hT'$

A vulnerabilidade de aquíferos semiconfinados é controlada pelas propriedades físicas e geométricas do aquífero que o recobre tais como permeabilidade vertical, porosidade e espessura e, sobretudo pela diferença de potencial hidráulico que guarda com o aquífero livre sobreposto. Esta diferença, em condições normais, sem alteração, geralmente é pequena, alguns decímetros a poucos metros, aumentando nos locais onde ocorrem explorações de água, quando pode alcançar dezenas a centenas de metros. (AUGE, 2004).

Auge (2004) enfatiza que o desenho baixo representa uma relação hidráulica natural com um $\Delta h1$ favorável ao aquífero livre, que define o setor como sendo de

recarga do semiconfinado e um Δh_2 , favorável a este último que caracteriza o setor como de descarga (Figura 4).

O aquífero semiconfinado só pode se contaminar a partir do aquífero livre na área de recarga, porém não na área de descarga.

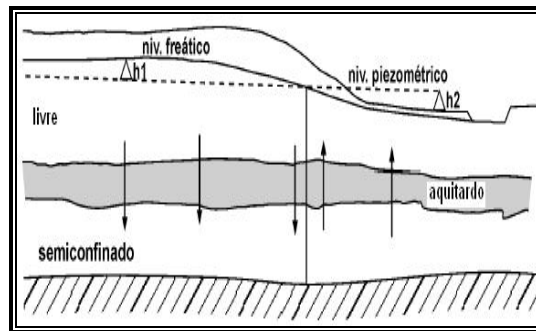


Figura 4 - Potenciais Hidráulicos Naturais – Aquífero Livre e Semiconfinado

Fonte: Auge (2004)

Segundo Auge (2004) pode-se observar que: a nova relação hidráulica entre os dois aquíferos decorrente do bombeamento do poço, cuja conseqüência é danosa para a vulnerabilidade do Semiconfinado, em virtude do rebaixamento da superfície piezométrica, com a conseqüente sobrecarga hidráulica do aquífero livre no trecho do aquitarde, o que facilita a infiltração vertical descendente e o acesso de contaminantes ao aquífero Semiconfinado (Figura 5).

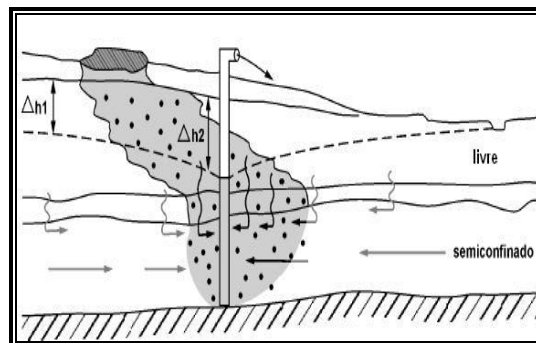


Figura 5 - Contaminação por Bombeio - Aquífero Semiconfinado

Fonte: Auge (2004)

A figura acima possibilita visualizar que a permeabilidade vertical do aquitarde (K') e sua transmissividade vertical ($T' = K'/e'$) não são de fácil determinação. Uma forma é mediante testes de bombeamento, porém estes podem oferecer valores mais altos que os reais, particularmente quando os poços existentes carecem de um bom isolamento entre o aquífero livre e o semi-confinado. (AUGE, 2004).

A alternativa mais representativa é comparar a “freatimetria” com a piezometria da mesma zona e obter um mapa residual, com as diferenças de potencial hidráulico entre os aquíferos freático e semi-confinado, e a partir deste último, conhecendo o fluxo pelo aquífero semi-confinado, estimar o valor de (T). (AUGE, 1986).

Magnitudes de T' entre 10^{-3} e 10^{-6} m^2/dia são típicas de aquíferos semiconfinados, entretanto, aqueles menores de 10^{-6} indicam um alto grau de confinamento e as maiores que 10^{-3} , apontam para aquíferos livres e semi-livres.

Auge (2004) destaca que um valor de $T' = 5 \times 10^{-4}$ m^2/dia significa que por cada metro de diferença de potencial hidráulico entre o aquífero semi-confinado e o freático, irá fluir por uma superfície de 1m^2 de material selante do aquitarde 5×10^{-4} m^3 de água (0,5 litros) ao fim de um dia. Este volume, aparentemente desprezível, deixa de sê-lo diante das dimensões naturais do trecho confinado (centenas a milhares de km^2).

“Os potenciais hidráulicos relativos das unidades hidrogeológicas semiconfinadas são fundamentais, pois condicionam o fluxo vertical. Se os níveis são próximos, o fluxo descendente, através do aquitarde será muito limitado” (Figura 6).

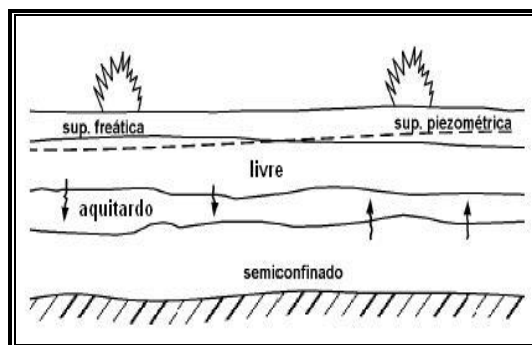


Figura 6 - Fluxo Através do Aquitarde - Potenciais Hidráulicos Naturais

Fonte: Auge (2004)

Porém, esta dinâmica vertical se acentua significativamente em condições de bombeamento por poços (Figura 7).

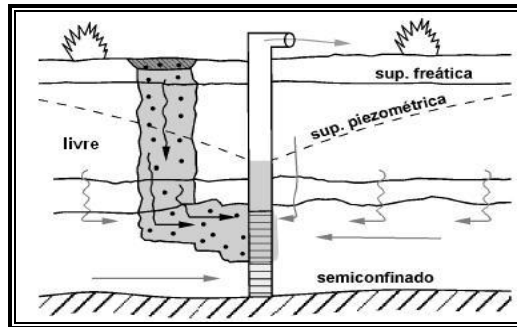


Figura 7 - Fluxo Através do Aquitardo - Potenciais Hidráulicos Artificiais

Fonte: Auge (2004)

Dos esquemas se verifica que a situação menos favorável para a proteção do aquífero semi-confinado se dá quando seu potencial hidráulico é menor que o do freático, ou seja, existe um gradiente hidráulico vertical negativo em profundidade (Figura 8).

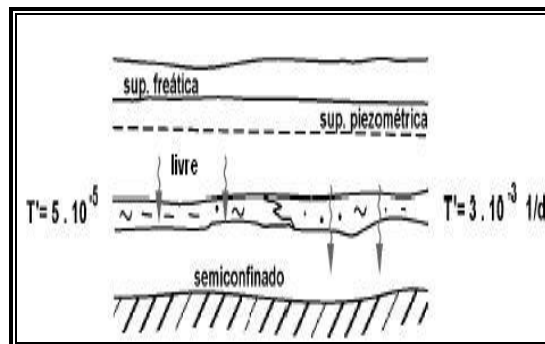


Figura 8 - Fluxo Através do Aquitardo por Variação da Transmissividade Vertical

Fonte: Auge (2004)

As variáveis (potencial hidráulico e transmissividade vertical) podem estabelecer 3 graus de vulnerabilidade (alta, média e baixa), determinados primeiramente, pelo gradiente vertical do potencial hidráulico e secundariamente pela transmissividade vertical (T'). (AUGE, 2004).

O autor ainda ressalta que os potenciais hidráulicos podem variar, tanto por causas naturais (período de excesso ou déficit hídrico), como artificiais

(bombeamento) e que isso pode modificar o sentido do fluxo vertical, portanto, deve-se acompanhar periodicamente a evolução espacial e temporal dos mesmos (monitoramento).

Denominando-se como H_1 o potencial hidráulico do aquífero livre e como H_2 o do semiconfinado teremos as seguintes condições. (Tabela 17).

Tabela 17 - Vulnerabilidade do Aquífero Semiconfinado em Relação ao Livre Associado

$H_2 > H_1$	Vulnerabilidade baixa
$H_2 \approx H_1$	Vulnerabilidade média
$H_2 < H_1$	Vulnerabilidade alta

Fonte: Auge (2004)

A isto se adiciona a resistência hidráulica oferecida pela camada selante ao fluxo vertical. (Tabela 18).

Tabela 18 - Vulnerabilidade do Aquífero Semiconfinado em Relação a Transmissividade Vertical do Aquitarde Sobreposto

$T' < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{dia}$	Vulnerabilidade baixa
$10^{-5} < T' \text{ m}^2/\text{dia}$	Vulnerabilidade média
$T' > 10^{-3} \text{ m}^2/\text{dia}$	Vulnerabilidade alta

Fonte: Auge (2004)

É um método para aquíferos que apresentam confinamento parcial. É o resultado do produto da diferença do potencial hidráulico entre os aquíferos livre e o Semiconfinado (Δh) pela transmissividade do vertical do aquitarde (T).

No caso do método $\Delta h T'$ os potenciais hidráulicos podem variar, tanto por causas naturais, períodos de excesso ou déficit hídrico, como por causas artificiais, o bombeamento dos poços e modificar o sentido do fluxo vertical, expondo o aquífero a ação dos contaminantes. (AUGE, 2004).

A síntese contendo as equações e as variáveis dos principais métodos descritos são apresentadas na Tabela 19.

A escolha de um ou de outro método depende de vários fatores entre os quais se destacam: difusão e alcance da metodologia, informação disponível, alcance da avaliação e validação dos resultados. (AUGE, 2004).

Tabela 19 - Síntese Com Equações e Variáveis dos Principais Métodos

EPPNA	Índice de vulnerabilidade varia de muito baixa a alta partir das características litológicas e hidrogeológicas.
EKv	Índice = E.Kv , sendo (E) profundidade de superfície freática e (Kv) a permeabilidade vertical da zona saturada.
GOD	Índice = G.O.D , sendo (G) o grau de confinamento (O) a litologia e o grau de consolidação da cobertura e (D) a profundidade da superfície freática.
DRASTIC	Índice = D.Dw + R.Rw + A.Aw + S.Sw + T.Tw + I.lw + C.Cw , sendo (D) a profundidade da superfície freática (R) a taxa de recarga (A) tipo do aquífero, tipo de solo (T) topografia ou declividade do terreno (I) Impacto da zona não saturada e (C) condutividade hidráulica. Dw=5 e, Rw=4, Aw=3, Sw=2, Tw=1, lw=5 e Cw=3, os respectivos fatores de ponderação.
SINTACS	Índice = S.Sw + I.lw + N.Nw + T.Tw + A.Aw + C.Cw + S.Sw , sendo (S) a profundidade da água (I) infiltração (N), seção saturada (T) , tipo de solo (A), características do aquífero (C), condutividade hidráulica e (T) declividade topográfica. Sw=22, lw= 8, Nw=12, Tw=9,8, Aw=17,7, Cw=18,6, Sw=11,9,os respectivos fatores de ponderação.
EPIK	Índice = (α.Ei) + (β.Pi) + (γ. li) + (δ.ki) , sendo: E1= 1, E2= 2, E3= 3; P1= 1, P2= 2, P3= 3, P4= 4; l1= 1, l2= 2, l3= 3, l4= 4; K1= 1, K2= 2, K3= 3; e α=3, β=1, γ=3 e δ=2, os fatores de ponderação.
AVI	Índice = Σ (di / Ki) , sendo (Ej) a espessura de cada camada j acima do aquífero superior e (Kj) a condutividade hidráulica estimada em cada camada.
IS	IS = D x (0,186)+R x (0,212)+A x (0,25)+T x (0,12)+LU x (0,222) , sendo as variáveis; D, R, A e T extraídas do DRASTIC, método que lhe deu origem com a substituição dos índices (I) e (C) por Ocupação do Solo (LU), multiplicadas pelos respectivos ponderadores.
DRASTIC PESTICIDE	Índice = D.5 + R.4 + A.3 + S.5 + T.3 + I.4 + C.2 , sendo que as variáveis são as mesmas do DRASTIC, com modificações nos fatores de ponderação.
ΔhT'	Índice = Δh.T' , sendo (Δh) a diferença do potencial hidráulico entre os aquíferos livre e o semiconfinado e (T), a transmissividade vertical do aquífero.

Fonte: Maia (2011)

3.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Existem numerosas metodologias para qualificar a vulnerabilidade e permitir seu mapeamento em diferentes escalas, em sua grande maioria, desenvolvidos para aquíferos livres. A escolha de um ou de outro método depende de vários fatores entre os quais se destacam: difusão e alcance da metodologia, informação disponível, alcance da avaliação e validação dos resultados.

Os métodos mais conhecidos e utilizados são sistemas paramétricos, aqueles que usam variáveis indicadoras de vulnerabilidade e parâmetros de ponderação nas equações, para produzir um índice de vulnerabilidade. Os parâmetros de ponderação são utilizados para realçar os efeitos de algumas variáveis e minimizar de outras, a partir da importância atribuída a cada uma delas.

Os fatores que afetam o comportamento hidrogeológico variam, no caso dos aquíferos fissurais, dependem da intensidade do fraturamento, nos cársticos, do grau de carstificação e, nos aquíferos sedimentares dependem de ambientes deposicionais e de processos diagenéticos que não são considerados nas tabelas usadas para determinar as variáveis e provocam distorções nos índices.

Auge preconizava em 2004 uma tendência à formulação de metodologias quantitativas no futuro em decorrência do avanço no desenvolvimento de modelos numéricos e as vantagens que oferecem sistemas como o GIS, que permitem armazenar grande quantidade de informação e processá-las rapidamente, para a obtenção de produtos atualizados no espaço e no tempo.

A maioria das variáveis usadas nos métodos mais conhecidos tem seus valores estimados por meio de tabelas que desconsideram os diferentes processos que deram origem as rochas que compõe os aquíferos. A possibilidade de se obter índices similares por meio de uma combinação muito diferente de situações também pode ocasionar riscos na tomada de decisões (Tabela 20).

Tabela 20 - Variáveis Medidas e Estimadas para o Cálculo da Vulnerabilidade dos Principais Métodos

	DRASTIC		GOD		SINTACS		EPIK		EK _v
D	Profundidade da água	G	Tipo de Aquífero	S	Profundidade da água	E	Intensidade de carstificação	E	Profundidade da água
R	Recarga	O	Litologia da cobertura	I	Infiltração	P	Espessura da cobertura	K_v	Permeabilidade e vertical
A	Litologia do Aquífero	D	Profundidade da água	N	Zona não Saturada	I	Infiltração		
S	Tipo de solo			T	Tipo de Solo	K	Rede cárstica		
T	Declividade Topográfica			A	Característica do aquífero				
I	Litologia da zona subsaturada			C	Condutividade hidráulica				
C	Condutividade Hidráulica			S	Declividade topográfica				

Fonte: Maia (2011)

D/P – Variáveis Medidas

R/I – Variáveis Estimadas em Tabelas

4 AS VARIÁVEIS

Neste capítulo foram descritas as treze variáveis mais utilizadas nos métodos tradicionais bem como novas variáveis propostas para serem avaliadas com a finalidade de selecionar as mais adequadas para a dedução da equação do novo método.

4.1 VARIÁVEIS MAIS UTILIZADAS

A seguir descreve-se com detalhe as treze variáveis mais utilizadas nos métodos tradicionais de cálculo da vulnerabilidade, observando: a forma de obtenção, a relação com o fator de proteção e com a vulnerabilidade, a forma de atuação e limitações.

4.1.1 Profundidade da Água (D)

É a profundidade do nível estático obtida por meio da medida da boca do poço até o nível da água sem bombeamento. A pressão da água nesta superfície está em equilíbrio com a pressão atmosférica. Apresenta uma forte relação com a topografia do terreno.

Apresenta efeitos de proteção relacionados não só a acessibilidade ao meio aquífero, como também a atenuação de contaminantes da zona não saturada. As reações físico-químicas que ocorrem nesta zona promovem a degradação e/ou captura dos contaminantes.

É uma variável que possui uma relação direta com o fator de proteção e inversa com a vulnerabilidade, quanto maior for a profundidade do nível estático, maior será o fator de proteção e menor será a vulnerabilidade do aquífero.

Está sujeita a alterações sazonais, seus valores aumentam no período chuvoso com a recarga do aquífero e sofrem reduções nos períodos secos, essas alterações fazem com que a coleta desses dados seja realizada sempre considerando o período

da medição, principalmente se os dados forem utilizados para a determinação da superfície potenciométrica que fornece a direção do fluxo subterrâneo.

A sua variação espacial depende da superfície potenciométrica, da superfície topográfica e da topografia do substrato. Em linhas gerais, o nível freático acompanha aproximadamente a topografia do terreno.

Nos casos em que a biodegradação dos contaminantes depende de atividades aeróbicas, diferenças serão encontradas entre as áreas onde o nível freático é superficial e aquelas onde ele é profundo.

Alguns contaminantes de baixo peso molecular, como diclorometano, alcoóis, cetonas e ésteres, são imobilizados ou degradados em produtos pouco ou nada tóxicos por processos biológicos, físicos e químicos, porém o mesmo não ocorre com metais e compostos organoclorados.

Para atingir a água subterrânea, os contaminantes têm que atravessar três setores distintos da zona de aeração.

O primeiro setor com umidade na parte mais superficial do solo, onde a perda de água para a atmosfera é intensa. Em alguns casos, quando é muito elevada a quantidade de sais decorrente da evaporação da água, estes precipitam na superfície do terreno e tornam os solos salinizados.

O segundo setor intermediário com umidade maior do que na zona superficial do solo e menor do que o terceiro setor, denominado de franja capilar localizada imediatamente abaixo próxima à zona de saturação abaixo da superfície freática.

Trata-se de uma variável bastante eficiente e sua atuação transcende a proteção do aquífero por acessibilidade, uma vez que os contaminantes ao atravessar os diferentes segmentos da zona de aeração, são submetidos a um processo de atenuação natural, no qual os menos densos são imobilizados ou degradados por meio de processos físico, químicos e biológicos.

4.1.2 Taxa de Recarga do Aquífero (R)

A recarga pode ser definida como a reposição sazonal de água no aquífero por meio da chuva, por meio da infiltração direta no local ou por escoamento superficial

e/ou subterrâneo, portanto, sua magnitude ou taxa de recarga seria a quantificação do aporte de água para o aquífero.

A recarga do aquífero pode ser determinada por diversas metodologias:

- a) os métodos diretos descrevem a recarga como um mecanismo de percolação da água desde o solo até ao aquífero, utilizando, para obter uma estimativa da recarga, parâmetros como a variação de umidade no solo, evapotranspiração (ET) e caudal de escoamento superficial; e,
- b) os métodos indiretos utilizam informação piezométrica como indicador da recarga efetiva, ou seja, sempre que há variações positivas do nível piezométrico, encontra-se diante de um episódio de recarga, passível de ser quantificada, desde que se conheçam alguns parâmetros básicos do sistema hidrogeológico como o Coeficiente de armazenamento (S), o Coeficiente de recessão que é o período de tempo entre o episódio de precipitação e a resposta do aquífero (CR) e a Condutividade hidráulica (K).

Não há uma metodologia consagrada para o cálculo da recarga de um aquífero livre. No entanto, possibilita-se a utilização de dois métodos apresentados por Oliveira *et al.* (1997, *apud* LOBO-FERREIRA, 1990) que permitem, a partir de informação de base, estimar e extrapolar a recarga dos aquíferos.

O Método de Vermeulen *et al.* (1994, *apud* LOBO-FERREIRA, 1990) é utilizado nos casos de formações porosas em que se pode considerar a água disponível abaixo da camada de solo incorporada ao aquífero. O outro método utiliza a reta de correlação da recarga (R) sobre a precipitação (P), utilizando a expressão $R = 0,551 \times P - 323$ (mm/ano), considerando-se a recarga nula quando P é inferior a 586 mm/ano, de acordo com Oliveira *et al.* (1997, *apud* LOBO-FERREIRA, 1990).

Além destes dois métodos há ainda a possibilidade de atribuir o índice a partir da geologia. Esta opção é decorrente da dependência da recarga de propriedades hidráulicas das formações geológicas. É frequente os trabalhos sobre hidrogeologia referirem a recarga em função das formações geológicas.

Todos os métodos que utilizam esta variável, admitem que a taxa de recarga apresenta uma relação inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade, quanto maior a recarga, menor o fator de proteção do aquífero e maior a vulnerabilidade.

Em aquíferos confinados, a zona de recarga é a região onde este aquífero aflora à superfície do terreno, desde que este local esteja com um nível piezométrico mais elevado que a pressão reinante na parte saturada do mesmo. Caso a região de afloramento esteja a uma pressão menor, esta região será de exudação do aquífero.

A recarga potencial é a mesma pluviosidade média anual, traduzida pelo volume de água subterrânea que seria incorporado às reservas de água em uma formação aquífera se esta tivesse capacidade de armazenamento suficiente para comportar toda a água precipitada. A recarga real é capaz de saturar o reservatório e o excedente escoar na superfície. A decisão de usar diretamente o valor da pluviosidade média anual foi para evitar o uso de tabelas no cálculo da recarga.

Nas áreas de ocorrência de formações sedimentares, as recargas reais encontram-se próximas das recargas anuais potenciais e nas zonas de afloramentos de rochas fraturadas, estes valores encontram-se muito mais afastados das recargas reais, provavelmente decorrente do fluxo subterrâneo nos aquíferos sedimentares e das limitações na capacidade de armazenamento dos aquíferos fissurais.

As taxas de recarga variam no espaço e no tempo, sua atuação depende de diversos fatores combinados, tais como: precipitação, climatologia, escoamento superficial, características do aquífero e tipo de solo. Estas condições tornam os diversos métodos para o cálculo de recarga com pouca precisão em estudos regionais.

A relação matemática é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade, quanto maior a recarga maior a vulnerabilidade. A decisão de usar diretamente o valor da pluviosidade média anual foi para evitar o uso de tabelas no cálculo da recarga.

A água das chuvas além de recarregar o aquífero, transporta os contaminantes para a zona saturada e também promove a diluição daqueles solúveis em água. Em áreas onde as condições climáticas favorecem precipitações mais elevadas, a recarga

transcende a capacidade de armazenamento dos aquíferos e o excedente, após a saturação, é incorporado ao escoamento superficial, por meio de fluxos ascendentes e horizontais, estabelecendo localmente uma eficiente condição de proteção do aquífero que será tratada como uma variável a parte.

4.1.3 Natureza do Aquífero (A)

É a descrição do aquífero com base nas características litológicas que possuem algum significado hidrogeológico, particularmente aquelas relacionadas com a permeabilidade e a porosidade das rochas constituintes.

A obtenção dessa variável pode ser feita a partir de mapas geológicos ou perfis de poços tubulares e os valores paramétricos são definidos em tabelas. Apresenta uma distribuição espacial variável, coincidente com as poligonais dos contatos geológicos e sua atuação, por ser dependente das características das rochas, é permanente.

O fator de proteção está relacionado com a permeabilidade e a porosidade das rochas que compõem os aquíferos. Quanto maior a permeabilidade e a porosidade do aquífero, maior será a facilidade de penetração de contaminantes, e maior será a sua vulnerabilidade.

É uma variável que indica uma maior ou menor acessibilidade de contaminantes ao aquífero. As litologias são hierarquizadas em classes de natureza impermeáveis até as mais permeáveis que são aquelas que oferecem maiores facilidades naturais à penetração da água, vetor que conduz os contaminantes para o interior do aquífero. Sua relação é direta com a vulnerabilidade e inversa com os fatores de proteção.

Trata-se de uma variável determinada por meio de tabelas que não considera a gênese e os processos diagenéticos que ocorreram nas rochas, fatores que determinam o comportamento hidrogeológico dos aquíferos e, sua utilização pode provocar distorções nos índices de vulnerabilidade.

Os dados relativos às classes e valores tabelados não são suficientes para definir se um aquífero constituído por uma determinada litologia, de locais distintos ou

de idades diferentes, será mais ou menos vulnerável que outra a qualquer tipo de contaminante.

As características e o comportamento hidrogeológico das rochas variam no espaço e no tempo geológico. No caso dos aquíferos fissurais depende da intensidade do fraturamento, nos cársticos do grau de carstificação e nos aquíferos sedimentares dependem de ambientes deposicionais e processos diagenéticos.

Mesmo admitindo que determinados tipos de rochas tenham maior ou menor capacidade de atenuação ou ofereçam maior ou menor acessibilidade a substâncias contaminantes, é muito difícil quantificar de maneira objetiva o fator de proteção ou a vulnerabilidade dos respectivos aquíferos.

4.1.4 Natureza do Solo (S)

A natureza do solo é uma variável definida com base em suas características físico-químicas, que foram hierarquizadas a partir de suas propriedades, das mais argilosas até as mais porosas, incluindo a condição extrema representada pela ausência de solo. Sua relação é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade (Tabela 9).

Sua determinação pode ser por meio de mapas pedológicos e tabelas, nos quais a vulnerabilidade é crescente a partir dos solos mais argilosos para os menos argilosos, até os solos delgados ou sua total ausência como os tipos litólicos da região semi-árida.

Apesar da vulnerabilidade e do fator de proteção ser abordada somente em relação a natureza do solo, vale ressaltar a importância do fator de proteção representado por sua espessura, uma vez que, em áreas onde os solos são espessos o aquífero está melhor protegido.

Os efeitos da proteção não estão relacionados somente a acessibilidade de contaminantes ao aquífero, mas, sobretudo, às reações físico-químicas que ocorrem na interação do contaminante com o solo que promovem a sua atenuação por meio de captura e/ou degradação da contaminação.

A atuação da variável é permanente, pois depende exclusivamente das propriedades e características dos solos e não apresenta efeitos sazonais.

A variação na distribuição espacial dos solos está ligada à atuação dos fatores pedogenéticos tais como: a rocha que lhe deu origem, o clima, o relevo, o tempo e os organismos, que são determinantes para produzir os diversos tipos de solos na natureza.

A matéria orgânica tem grande capacidade de adsorver uma gama variada de metais pesados e moléculas orgânicas. Os solos tropicais apresentam forte tendência em reter os metais pesados lançados na prática da atividade agrícola.

Um poluente após atingir o solo, poderá passar por uma série de reações químicas, bioquímicas, fotoquímicas e inter-relações físicas com os constituintes do solo antes de atingir a água subterrânea. Estas reações poderão neutralizar, modificar ou retardar sua ação poluente.

4.1.5 Declividade do Terreno (DT)

É definida como a inclinação do terreno em relação a um plano horizontal, é uma variável obtida a partir de um mapa topográfico. O efeito de proteção sobre o aquífero está relacionado a acessibilidade de contaminantes.

Considerando que a água é o principal vetor de contaminação dos aquíferos e que a declividade elevada do terreno favorece o escoamento superficial e provoca a redução da infiltração e a baixa declividade do terreno favorece a infiltração e reduz o escoamento da água. Sua relação com o fator de proteção é direta e inversa com a vulnerabilidade, quanto maior a declividade, maior o fator de proteção e menor a vulnerabilidade.

Em aquíferos livres de maneira geral, a inclinação da superfície piezométrica acompanha a superfície topográfica. As relações espaciais entre os planos que representam a superfície topográfica e o topo do lençol freático é que determina a ocorrência de nascentes e de zonas de recarga.

A atuação da variável é naturalmente permanente no tempo, exceto em casos de erosão, terraplanagem e assoreamento provocados por ações antrópicas. O efeito

de proteção é localizado, preferencialmente, nas vertentes onde ele atua com mais intensidade, favorecendo o transporte dos contaminantes por meio da gravidade para as partes mais baixas do terreno, as áreas consideradas mais vulneráveis em relação a esta variável.

Caso os contaminantes sejam solúveis, eles serão carreados para as partes baixas e planas, portanto mais vulneráveis e irão penetrar no aquífero. Se eles forem sólidos, serão transportados por agentes modeladores para as áreas mais vulneráveis e a sua penetração no aquífero irá depender de diversos fatores como a sua solubilidade e reações que ocorrem na zona subsaturada que podem retardar ou mesmo impedir seu aporte ao aquífero.

4.1.6 Impacto na Zona Subsaturada (I)

Definida como uma variável relacionada ao tipo litológico que ocorre na zona não saturada do aquífero, na qual são atribuídos valores numéricos crescentes com a permeabilidade e porosidade das rochas constituintes dessa seção.

Esta variável é vinculada ao tipo de rocha que compõe os aquíferos, determinada em um mapa geológico ou nos perfis litológicos dos poços, cujos valores são obtidos em tabelas elaboradas pelos autores do método DRASTIC para o cálculo das vulnerabilidades. Os valores aumentam das argilas para os folhelhos, seguido pelos calcários, arenitos, cascalhos, rochas metamórficas e ígneas, até os calcários carstificados.

Apresenta uma relação inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade. Quanto menor a permeabilidade e porosidade das litologias da zona subsaturada, maior será o fator de proteção e menor a vulnerabilidade e, quanto maior a permeabilidade menor será o fator de proteção e maior a vulnerabilidade do aquífero.

É uma variável com atuação permanente, pois seus efeitos não mudam com o tempo. As variações espaciais são decorrentes das variações laterais e verticais nas características das rochas que influenciam na porosidade e permeabilidade do aquífero.

Trata-se de uma variável cujo fator de proteção está associado à acessibilidade de contaminantes ao aquífero.

Considerando a grande diversidade de fatores que influenciam as características de permeabilidade e porosidade das rochas, tais como, ambientes deposicionais, processos tectônicos, idades, fazem com que a sua determinação, por meio de tabela, seja um pouco subjetiva mesmo considerando os intervalos de variação.

4.1.7 Condutividade Hidráulica (C)

Definida como a propriedade de um meio de permitir a passagem de água ou de outro fluido, em maior ou menor vazão por unidade de área. Esta propriedade depende das características do meio, tais como: porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas, das propriedades do fluido, viscosidade e peso específico.

Significa a medida da permeabilidade vertical do aquífero, obtida a partir de um ábaco que relaciona a litologia com a condutividade hidráulica dos aquíferos. A condutividade hidráulica corresponde ao coeficiente de proporcionalidade K que aparece na Lei de Darcy, podendo ser determinada através de fórmulas, métodos de laboratório ou ensaios de campo ou estimada por meio de ábacos, os seus valores são geralmente expressos em m/s ou cm/s.

A atuação como fator de proteção também está relacionada a acessibilidade de contaminantes ao aquífero, decorrente da maior ou menor permeabilidade das rochas constituintes. Sua relação com o fator de proteção é inversa e com a vulnerabilidade é direta. Quanto maior for a condutividade hidráulica, menor será o fator de proteção e maior a vulnerabilidade. Quanto menor for a condutividade, maior será o fator de proteção e menor a vulnerabilidade do aquífero.

Considerando que os efeitos produzidos estão vinculados as características intrínsecas das rochas, sua atuação é permanente. A distribuição espacial é variável, tanto na vertical como na horizontal, em decorrência da anisotropia dominante nos meios aquíferos.

Os materiais consolidados apresentam, geralmente, uma condutividade hidráulica mais baixa do que a correspondente em materiais soltos, devido à presença do cimento que diminui a dimensão dos poros, chegando mesmo a impedir a comunicação entre estes.

Nem sempre é possível relacionar condutividade hidráulica com a porosidade, um terreno muito poroso pode ter uma elevada condutividade hidráulica, se os seus poros forem grandes e bem interconectados, como é o caso das areias, ou ter uma condutividade hidráulica quase nula, se os seus poros são muito pequenos, tal como se verifica em determinados materiais vulcânicos cujos poros são originados pela liberação de gases.

A melhor opção para calcular essa variável é pelo método de Cooper e Jacob *apud* Rodrigues (2004), quando os poços dispõem de testes de bombeamento de qualidade.

4.1.8 Infiltração (I)

É definida como o processo em que a água proveniente da precipitação penetra no solo ou rocha através de poros, fissuras, fraturas ou diáclases, ocupando total ou parcialmente os espaços vazios. Uma parte da água que infiltra atinge a zona saturada e passa a fazer parte da água subterrânea, a outra fica retida na zona não saturada e pode regressar à atmosfera através da evapotranspiração.

Pode ser obtida por meio de um balanço hídrico ou por medidas diretas em campo utilizando tabelas para os diversos tipos de solo.

Esta variável apresenta uma relação direta com a vulnerabilidade e inversa com o fator de proteção. Quanto maior a capacidade de infiltração, maior será a vulnerabilidade do aquífero e menor será o fator de proteção. Quanto menor a capacidade de infiltração, menor a vulnerabilidade e maior o fator de proteção.

Considerando que a variação espacial está relacionada a propriedades naturais dos solos, cobertura vegetal, declividade do terreno e tipo de chuva, a atuação do fator de proteção pode ser considerada permanente apesar de depender da manutenção das condições de alguns fatores supracitados. Seu efeito protetor

também está relacionado a acessibilidade ao aquífero, tanto da água quanto de contaminantes.

A taxa de infiltração de água no solo depende da porosidade, da argilosidade, da cobertura vegetal, da declividade do terreno e do tipo de chuva. A água que infiltra está submetida a duas forças fundamentais: a gravidade que promove o movimento vertical e as forças capilares que promove a adesão das moléculas às superfícies das partículas do solo. A infiltração eficaz se refere aquele volume de água que alcança a zona saturada.

4.1.9 Rede Cárstica (K)

É definida como o conjunto de estruturas originadas pelo processo de dissolução de rochas solúveis, como calcários e dolomitos que tem como consequência o aumento da porosidade e da permeabilidade secundárias que permite armazenar e escoar grandes quantidades de água subterrânea.

A variável Rede Cárstica se refere à avaliação subjetiva da carstificação, utilizando três valores, K_1 para uma rede cárstica bem desenvolvida, K_2 para zonas pobremente carstificadas e K_3 para aquíferos com descarga em meios porosos ou com fraturamento subordinado e quatro fatores de ponderação supracitados. (Tabela 10)

Possui uma relação direta com a vulnerabilidade e inversa com o fator de proteção, quanto maior a carstificação, maior vulnerabilidade e menor o fator de proteção. E quanto menor a carstificação, menor a vulnerabilidade e maior o fator de proteção.

A intensidade da carstificação produz uma elevação proporcional na porosidade e na permeabilidade do aquífero. A sua atuação está relacionada com a acessibilidade de contaminantes ao aquífero. Quanto mais intensa a carstificação, mais acessível fica o aquífero.

As regiões mais carstificadas são aquelas que estão ou foram expostas a maior quantidade de água que promove e acentua os processos de dissolução das rochas

carbonáticas, melhorando as condições de armazenamento da água subterrânea, mas também aumentando a vulnerabilidade do aquífero.

4.1.10 Epikarst (E)

É definida como uma zona de intensa carstificação com elevada permeabilidade próxima à superfície do terreno. Sua determinação é feita com base em fotografias aéreas e apoio em campo, porém sua quantificação é realizada de forma bastante subjetiva, atribuindo valores para cada estágio geomorfológico observado.

A esta zona pode ser atribuída três valores: E_1 para regiões com rede cárstica típica onde ocorrem dolinas, depressões, cavidades, grutas, etc.; E_2 quando apresentam superfícies frágeis na zona superficial que geram alinhamentos ravinas, dolinas alinhadas, vales cegos e E_3 ausência de morfologia cárstica.

O fator de proteção está relacionado à acessibilidade ao aquífero, quanto mais incipiente for a carstificação, maior será o fator de proteção e menor a vulnerabilidade e para regiões intensamente carstificadas, menor será o fator de proteção e maior a vulnerabilidade do aquífero.

A atuação da variável é permanente, pois se trata de características intrínsecas das rochas que não estão sujeitas a modificações no curto e médio prazo na escala tempo. A variação espacial da carstificação está diretamente relacionada a intensidade de fraturamento e a ocorrência de chuvas.

Também é um parâmetro específico e passível de ser utilizado somente no cálculo da vulnerabilidade de rochas carbonáticas e a maior limitação à sua utilização é a dificuldade de quantificar valores que reflitam as variações da carstificação.

4.1.11 Uso e Ocupação do Solo (U)

Uma variável definida pelos efeitos relacionados às condições naturais dos ecossistemas ou modificações decorrentes das atividades que envolvem o uso e a

ocupação dos solos. As transformações operadas no espaço determinam novas condições ambientais que induzem o meio a procurar um novo equilíbrio.

Pode ser obtida por meio de mapas específicos quando disponíveis ou fotografias aéreas e imagens de satélite com apoio de campo. Como a vegetação, esta variável é difícil quantificar, pois as condições relativas à infiltração e ao escoamento se modificam bastante com o uso do solo e, a depender do tipo de uso, esta variação é ainda maior.

Sua relação com o aquífero é variável; existem alguns tipos de usos que impermeabilizam os solos, provocando o aumento do escoamento superficial e a redução da vulnerabilidade, e outros que favorecem a infiltração, reduzem o fator de proteção e aumentam a vulnerabilidade.

É difícil avaliar e quantificar os efeitos causados pelo uso e ocupação da terra sobre o aquífero dada à complexidade e inter-relações dos fatores ambientais atuantes. Seus efeitos também são variáveis no espaço e no tempo devido a dinâmica na ocupação do espaço. O uso do solo se modifica no espaço e no tempo e não reflete as características intrínsecas do aquífero. Apresenta atuação dúbia, às vezes é responsável pelo aumento e outras pela redução da vulnerabilidade.

Não é uma variável intrínseca do aquífero e não está relacionada a suas defesas naturais contra contaminações ou suas vulnerabilidades o que dificulta e limita sua utilização. Está mais relacionada à identificação e o mapeamento das fontes impactantes.

4.1.12 Diferença de Potencial (P)

É definida como a diferença entre as pressões a que estão submetidas às águas de diferentes camadas de um determinado aquífero.

A diferença de potencial entre o aquífero livre e o semiconfinado sem exploração, encontra-se em equilíbrio com o aquífero subjacente cumprindo o papel de fator de proteção para o aquífero subjacente, porém o início do bombeamento do poço no nível semiconfinado, rompe o equilíbrio natural e a diferença de pressão reduz o fator

de proteção e o aquífero se torna mais vulnerável, favorecendo a penetração de contaminantes.

A relação desta variável é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade. Quanto maior a diferença de potencial, menor o fator de proteção e maior a vulnerabilidade do aquífero.

A diferença de potencial em condições naturais geralmente é pequena, varia de alguns decímetros a poucos metros, aumentando nos locais onde ocorrem explorações, quando pode alcançar dezenas a centenas de metros. Um mapa da diferença de potencial entre dois aquíferos irá destacar as áreas mais vulneráveis, aquelas onde o equilíbrio potencial foi rompido, facilitando a penetração de contaminantes no aquífero inferior.

Os potenciais hidráulicos relativos das unidades hidrogeológicas livres e semiconfinadas são fundamentais, pois condicionam o fluxo vertical. Se os níveis são próximos, o fluxo descendente através do aquífero será muito limitado, porém esta dinâmica vertical se acentua significativamente em condições de bombeamento por poços.

A situação menos favorável para a proteção do aquífero semiconfinado se dá quando seu potencial hidráulico é menor que o do freático; ou seja, existe um gradiente hidráulico vertical negativo em profundidade que aumenta sua vulnerabilidade.

Os potenciais hidráulicos podem variar, tanto por causas naturais, como os períodos de excesso ou déficit hídrico, como artificiais, o bombeamento de poços que pode modificar o sentido do fluxo vertical, portanto, a vulnerabilidade de um mesmo local pode variar no tempo.

A solubilidade a mobilidade e a persistência de certos contaminantes, como os nitratos fazem com que algumas variáveis percam consistência em relação à vulnerabilidade, porém, quando atuando a favor, esta variável se torna um eficiente fator de proteção do aquífero, portanto, deve-se evitar a extração de água em locais de risco para evitar a reversão no sentido do fluxo e favorecer a penetração de contaminantes no aquífero semiconfinado sobposto.

O bombeamento de um poço produz uma nova relação hidráulica entre dois aquíferos, cuja consequência é a elevação da vulnerabilidade do semiconfinado. Em virtude do rebaixamento da superfície piezométrica com a consequente sobrecarga hidráulica no aquífero livre, no trecho do aquífero facilita a infiltração vertical descendente e facilita o acesso de contaminantes ao aquífero semiconfinado.

4.1.13 Transmissividade do Aquífero (T)

É um parâmetro hidrogeológico que corresponde à capacidade de um meio para transmitir água, trata-se de uma variável influenciada pelas características hidrogeológicas locais.

Além de ser obtida por meio de testes de aquíferos, pode ser calculada com o produto da condutividade hidráulica pela espessura do aquífero ($T = K \times b$), onde T é a transmissividade, K é a permeabilidade e b é a espessura saturada do aquífero.

É a capacidade de um meio aquífero de transmitir água. Também pode ser definida como a quantidade de água que escoar através da seção vertical da rocha ou sedimento quando se diminui a carga hidráulica de uma unidade, e se expressa em m^2/dia ou cm^2/s . Sua relação com a vulnerabilidade é direta e com o fator de proteção inversa, quanto maior for transmissividade, menor será o fator de proteção e maior será a vulnerabilidade.

A ocorrência do aquífero já se constitui em um fator de proteção do aquífero sobposto e, sua maior ou menor capacidade de transmitir água implica em uma relação direta com a vulnerabilidade. É uma característica intrínseca do aquífero de atuação permanente que não é afetada por eventos de sazonalidade.

Sua distribuição espacial está relacionada a fatores genéticos que não variam no tempo, uma variação faciológica lateral pode fazer com que a transmissividade da camada não seja continuamente homogênea. Um aquífero com baixa Transmissividade pode se constituir em uma barreira física a penetração de contaminantes no aquífero.

Não é recomendada a utilização da transmissividade (TA) no cálculo da vulnerabilidade em aquíferos fissurais e cársticos devido a qualidade dos testes de

bombeamento, porém sua utilização em ambientes aquíferos granulares, onde os testes de bombeamento são de melhor qualidade, não deve ser descartada dada a importância dessa variável.

4.2 PROPOSTA DE NOVAS VARIÁVEIS

A seguir são propostas e descritas novas variáveis com a finalidade de selecionar, em conjunto com as anteriores, aquelas passíveis de serem utilizadas no novo método.

4.2.1 Densidade de Fraturas (DF)

Está relacionada a acessibilidade de contaminantes ao meio aquífero, quanto maior for o grau de fraturamento, maior será a acessibilidade. Sua relação é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade, quanto maior for a densidade de fraturas, menor será o efeito de proteção e maior a vulnerabilidade.

É uma variável definida como a quantidade total de lineamentos que representam estruturas abertas, por unidade de área expressa em n/km^2 ou comprimento total de lineamentos por unidade de área expresso em m/km^2 .

É específica para os aquíferos fissurais e cársticos, nos quais o tectonismo é determinante para a geração de estruturas abertas favoráveis a acumulação e circulação da água subterrânea.

É uma variável intrínseca do aquífero, cuja atuação do fator de proteção é permanente, considerando que a origem das fraturas está relacionada a eventos tectônicos do passado que determinaram sua distribuição espacial.

Sua determinação requer a elaboração de uma análise estrutural para avaliar os campos de tensão e definir as direções das fraturas abertas nas unidades aquíferas propostas no Zoneamento dos Aquíferos do Estado da Bahia (MAIA *et al.*, 2009). Após identificar as direções das estruturas abertas, estas serão mapeadas por meio de imagens de satélite ou fotografias aéreas para o cálculo da densidade de fraturas.

As lineações estruturais negativas, por representar as fendas e as fraturas, terão seus comprimentos medidos em cada unidade hidrogeológica definida no zoneamento e, o resultado dividido pela área avaliada para se obter a variável densidade de fratura.

Sua relação com contaminantes refere-se à acessibilidade ao aquífero. Áreas intensamente fraturadas são mais vulneráveis a penetração tanto da água, como também, de substâncias indesejáveis associadas.

4.2.2 Ocorrência de Água Superficial (AS)

É uma nova variável definida como a ocorrência de rios permanentes, reflexo da saturação dos aquíferos subjacentes, cujo excedente da água infiltrada assume movimentos ascendentes determinados pela energia potencial da água, responsável por um forte efeito de proteção para o aquífero.

O mapa com as poligonais que separam as áreas onde os rios são intermitentes das áreas em que estes são permanentes, em princípio pode ser obtido diretamente na Base Cartográfica do Estado da Bahia na escala 1:100.000, utilizando a hidrografia.

Esta variável avaliada em conjunto com a distribuição da precipitação poderá indicar as áreas nas quais a saturação do aquífero e a exudação de suas águas, propicia o desenvolvimento de uma drenagem superficial perene que atua como um fator de proteção do aquífero. A ocorrência de água superficial é uma variável que apresenta uma relação direta com o fator de proteção dos aquíferos.

Se os rios de uma região forem permanentes, o fator de proteção do aquífero será maior, considerando que este se encontra saturado e o vetor resultante que representa o movimento da água é ascendente e/ou horizontal, na direção do fluxo da água superficial, conseqüentemente, a vulnerabilidade será menor.

Se os rios forem intermitentes, o fator de proteção do aquífero é menor, uma vez que o mesmo não se encontra saturado e a resultante do movimento da água é vertical descendente, elevando a acessibilidade de contaminantes, conseqüentemente a vulnerabilidade do aquífero será maior.

Vale ressaltar que os fatores de proteção dependem do tipo de contaminante. Os contaminantes mais leves que a água, não conseguem penetrar no aquífero, devido ao fluxo ascendente aliado ao fluxo horizontal da água. O que não ocorre com os contaminantes mais densos que a água, cujo movimento resultante do fluxo hidrodinâmico com a densidade mais elevada dos contaminantes faz com que ele penetre e permaneça alojado no interior do aquífero.

Trata-se de uma variável de efeito sazonal em locais com baixa pluviosidade, como a região semi-árida. A atuação do fator de proteção fica limitada ao período chuvoso, quando a saturação do aquífero torna fluentes os rios temporários, reduzindo a vulnerabilidade dos aquíferos. Após as chuvas cessa a atuação do fator de proteção e os aquíferos retornam a condição anterior em termos de vulnerabilidade.

4.2.3 Cobertura de Proteção (CP)

Variável definida como uma cobertura sedimentar sobre o aquífero que o protege da contaminação. Em relação a sua origem, trata-se somente das coberturas alóctones, aquelas cujos constituintes vieram de fora ou de modificações diagenéticas, ocorridas após a deposição dos sedimentos como, por exemplo, a silicificação.

A individualização das áreas com ocorrência de cobertura de proteção de aquíferos para ser aplicada na determinação da vulnerabilidade dos aquíferos do Estado da Bahia, poderá ser feita utilizando o mapa geológico ou os estudos estratigráficos nas bacias sedimentares.

A cobertura de proteção é uma variável que possui uma relação direta com o fator de proteção, sua ocorrência aumenta o fator de proteção e reduz a vulnerabilidade do aquífero. O grau de proteção varia com a espessura, composição mineralógica e a porosidade e permeabilidade da camada de proteção.

A pior situação em termos de vulnerabilidade alta seria a de uma região de aquíferos fissurais ou cársticos sem qualquer tipo de cobertura, seja de solos ou de sedimentos, como em determinadas regiões semi-áridas. E a situação mais favorável,

de baixa vulnerabilidade seria a de uma bacia sedimentar com uma ou mais camadas argilosas confinando a camada produtora de água. Esta variável é resultante de fatores deposicionais que apresentam uma atuação permanente na proteção do aquífero sem admitir variação temporal ou espacial dos efeitos.

Esta é uma variável de notável eficiência na proteção do aquífero, cujo grau de proteção depende das características físico-químicas e da espessura da cobertura. Quanto mais impermeável for a cobertura, maior será o fator de proteção do aquífero.

4.2.4 Espessura do Solo (ES)

É uma variável cujo fator de proteção também está relacionado a acessibilidade ao aquífero e a atenuação de contaminantes. A espessura do regolito depende dos processos pedogenéticos influenciados pelo clima e pela natureza da rocha.

Formação natural de espessura variável, constituída por materiais não consolidados, que ocorre na superfície terrestre, originada a partir de mudanças físicas, químicas e biológicas que atuam sobre as rochas ao longo do tempo. Nesta tese é utilizada como sinônimo de regolito, na medida em que abrange todo o material inconsolidado que capeia as rochas. É a medida vertical da superfície do terreno até o topo do substrato rochoso.

Sua determinação poderá ser feita a partir de mapas pedológicos específicos, com a espacialização de dados dos perfis dos poços tubulares ou a integração das duas fontes de informação.

A espessura do solo varia com a tipologia climática, pois está relacionado com os efeitos do intemperismo decorrentes das chuvas. Regiões com precipitações elevadas produzem solos espessos e áreas com baixas precipitações produzem solos delgados ou inexistentes, porém não se exclui a possibilidade de encontrar solos espessos, paleosolos, em clima semi-árido decorrente de mudanças climáticas ocorridas. A seguir são apresentadas a distribuição da frequência das espessuras solos no mundo (Figura 9).

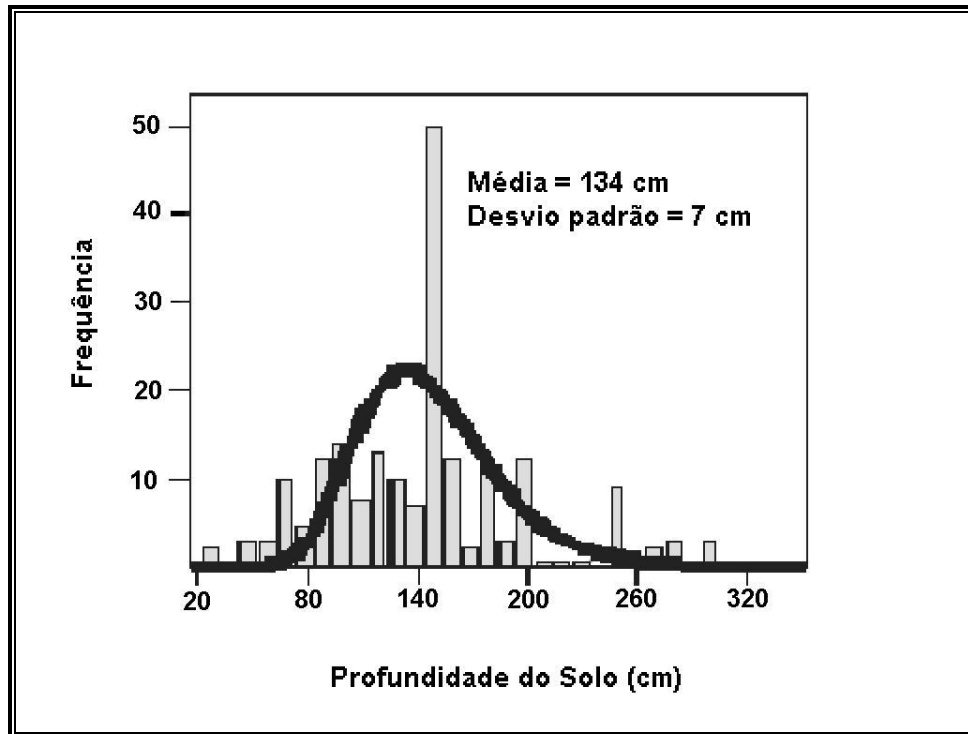


Figura 9 - Frequência de Profundidades dos perfis de Solo de Webb *et al.* (1991,1993)
 Fonte: Wilkinson & Mcelroy (2007)

Esta variável se constitui em um relevante fator de proteção para o aquífero. Sua atuação não depende de variações sazonais, porém sua distribuição espacial varia principalmente com o clima e com o tipo de rocha que lhe deu origem.

Sua relação com o fator de proteção é direta e com a vulnerabilidade é inversa. Quanto maior a espessura do solo, maior o fator de proteção e menor a vulnerabilidade e, quanto menor a espessura, menor o fator de proteção e maior a vulnerabilidade.

4.2.5 Cobertura Vegetal (CV)

É a vegetação nativa ou plantada em uma determinada área. Esta cobertura vegetal protege o solo da erosão, por meio da interceptação da chuva, induz a infiltração e provoca a redução do escoamento superficial. Quando preservada, produz um equilíbrio entre a infiltração e o escoamento superficial com efeitos sobre a erosão do solo e a recarga do aquífero. Os dados de cobertura vegetal podem ser obtidos em mapas de vegetação disponíveis na escala de 1:100.000 do Estado da Bahia.

Quanto mais densa a vegetação, maior a proteção do solo e conseqüentemente maior a infiltração e a recarga do aquífero. Sua atuação na proteção do aquífero está relacionada a acessibilidade de contaminantes.

Se a vegetação for densa e estiver preservada, maior a acessibilidade ao aquífero, se for rala ou inexistente menor a acessibilidade. Esta variável possui uma relação inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade.

A vegetação natural de uma região é o resultado da atuação de diversos fatores pedogenéticos, especialmente os de natureza climática e o tipo da rocha que lhe deu origem. Ela é o resultado do equilíbrio dinâmico dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica.

A distribuição natural dos grandes ecossistemas depende de vários fatores, principalmente do clima. Regiões úmidas possuem uma vegetação mais densa e exuberante, e as regiões secas uma vegetação rala ou ausente.

O processo de ocupação do espaço geográfico é responsável pela destruição da vegetação natural para dar lugar a culturas de valor econômico, alterando as condições dos ecossistemas. Entre essas mudanças estão o aumento do escoamento superficial, da erosão dos solos e a redução da infiltração que interferem no equilíbrio do sistema, diminuindo a recarga dos aquíferos.

A ocorrência da vegetação varia no espaço e no tempo devido aos processos supracitados comprometendo a sua utilização como variável no cálculo da vulnerabilidade. O efeito de proteção ou de vulnerabilidade dos aquíferos, somente aparece quando ela é retirada ou substituída e, as condições naturais são alteradas o que torna difícil sua aplicação.

A proteção natural dos aquíferos ou a sua vulnerabilidade se deve a atuação conjunta e combinada de diversas variáveis, algumas atuam no sentido de dar acesso aos contaminantes e outras atuam no sentido oposto de proteger o aquífero.

4.2.6 Capacidade Específica (CE)

É um parâmetro utilizado para comparar a produtividade de aquíferos e bastante influenciado pelas características hidrogeológicas locais. Sua determinação se faz por meio dos dados de teste de bombeamento.

É definida como a relação entre a vazão, em m^3/h , de um poço e o rebaixamento do nível d'água em metros. Esta variável se constitui na melhor forma de se comparar a produtividade de aquíferos distintos.

Bons aquíferos apresentam capacidade específica média de $3m^3/h/m$ e os aquíferos mais pobres apresentam uma média de $0,5m^3/h/m$ ou menos. Um aquífero com alta capacidade específica na produção de água, também tem maior facilidade de receber a água e ou contaminantes do que um aquífero com baixa capacidade.

Considerando que a facilidade ou dificuldade do aquífero tem para produzir água é a mesma que ele tem para aportá-la, a atuação do fator de proteção dessa variável está relacionada a acessibilidade de contaminantes ao aquífero. Sua relação é inversa com o fator de proteção e direta com a vulnerabilidade, quanto maior for a capacidade específica, menor é o efeito de proteção e maior a vulnerabilidade.

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As variáveis mais utilizadas para a qualificação da vulnerabilidade intrínseca são: profundidade da superfície freática, características litológicas e hidráulicas da zona subsaturada, espessura e tipo de solo, magnitude da recarga, litologia e tipo de aquífero. Entretanto, a solubilidade, mobilidade e persistência de certos contaminantes como os nitratos, fazem com que algumas destas variáveis percam consistência em relação à vulnerabilidade.

A análise das variáveis propiciou o entendimento do papel que cada uma exerce sobre os fatores naturais de proteção e suas relações com a vulnerabilidade e a proposição de novas variáveis ampliou as opções para seleção das mais adequadas para compor a equação do novo método.

A descrição com detalhe das variáveis, observando: a forma de obtenção, a relação com o efeito de proteção e com a vulnerabilidade, sua natureza e limitações foram fundamentais para subsidiar a seleção daquelas que irão compor a equação do novo método.

Com a finalidade de comparar as variáveis para facilitar a seleção daquelas mais indicadas para o novo método foram tabuladas suas principais características, (Tabela 21).

Tabela 21 - Características das Variáveis Tradicionais e Propostas para o Cálculo da Vulnerabilidade

Variáveis Tradicionais	Relação c/ vulnerabilidade	Obtenção	Eficiência	Atuação	Limitações	Pode ser utilizada
1.1 - Profundidade da água	Inversa	Fácil	Alta	Ac/At	Traduz acessibilidade	Sim
1.2 - Recarga do aquífero	Direta	Fácil	Relativa	Ac/Di	Efeito dúbio	Sim
1.3 - Natureza do aquífero	Direta	Fácil	Média	Ac/At	Tabelas/ subjetividade	Não
1.4 - Natureza do solo	Direta	Fácil	Alta	Ac/At	Tabelas/ subjetividade	Não
1.5 - Declividade do terreno	Inversa	Fácil	Média	Ac	Atuação local	Sim
1.6 - Impacto zona subsaturada	Direta	Fácil	Média	Ac/At	Tabelas/ subjetividade	Não
1.7 - Condutividade hidráulica	Direta	Difícil	Média	Ac	Superposição com a TA	Não
1.8 – Infiltração	Inversa	Fácil	Alta	Ac/Di	Tabelas/ subjetividade	Talvez
1.9 - Rede cárstica	Inversa	Difícil	Alta	Ac	Subjetividade na determ.	Não
1.10 – Epikarst	Inversa	Difícil	Alta	Ac	Subjetividade na determ.	Não
1.11 - Uso e ocupação do solo	Constante	Difícil	Baixa	Ac	Varia no tempo	Não
1.12 - Diferença de potencial	Constante	Difícil	Alta	Ac	Prop. Intrínseca e medida	Talvez
1.13 - Transmissividade	Direta	Difícil	Alta	Ac	Prop. intrínseca e medida	Sim
Variáveis Propostas						
2.1 - Densidade de fraturas	Direta	Difícil	Alta	Ac	Import.p/ aquíf. fissurais	Sim
2.2 - Água superficial	Constante	Difícil	Alta	Ac/Di/Re	Base cartográfica	Talvez
2.3 - Cobertura de proteção	Constante	Fácil	Alta	Ac/At	Mapa geológico	Talvez
2.4 - Espessura do solo	Inversa	Fácil	Alta	Ac/At	Obtida em perfis poços	Sim
2.5 - Cobertura vegetal	Variável	Difícil	Baixa	Ac	Varia com o tempo	Não
2.6 - Capacidade específica	Direta	Fácil	Alta	Ac	Traduz acessibilidade	Sim

Onde: Ac- Acessibilidade; Di- Diluição; At- Atenuação; RE- Remobilização

Fonte: Maia (2011)

5 O NOVO MÉTODO

Neste capítulo foram destacadas as variáveis escolhidas e a partir das relações entre elas e a vulnerabilidade foram deduzidas as equações, simulada uma aplicação do novo método e, por último, foram feitas considerações sobre alguns termos da equação.

5.1 SELEÇÃO DAS VARIÁVEIS PARA O NOVO MÉTODO

As variáveis foram selecionadas considerando: a forma de obtenção, essencialmente medidas; os efeitos de proteção, acessibilidade e/ou atenuação; a relação com a vulnerabilidade, direta ou inversa e a natureza da variável, propriedade intrínseca do sistema. A seguir são apresentadas as variáveis escolhidas para a dedução da equação e sua relação com a vulnerabilidade:

- a) Profundidade da Água (PA) - Relação Inversa;
- b) Espessura do solo (ES) - Relação Inversa;
- c) Declividade do Terreno (DT) - Relação Inversa;
- d) Capacidade específica (CE) - Relação Direta;
- e) Recarga potencial (RE) - Relação Direta;
- f) Densidade de Fraturas (DF) - Relação Direta;
- g) Transmissividade do Aquífero (TA) - Relação Direta.

5.2 DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO

Aqui foram deduzidas as equações, a partir dos conceitos teóricos sobre o tema e das relações matemáticas entre as variáveis e a vulnerabilidade.

Nomeando as variáveis: Profundidade da Água (PA); Espessura do Solo (ES); Densidade de Fraturas (DF); Capacidade Específica (CE) e considerando as relações entre cada uma delas com a vulnerabilidade temos que:

A Vulnerabilidade (V) possui:

1) Uma relação inversa com a Profundidade da Água (PA), Espessura do Solo (ES) e Declividade do terreno (DT), portanto:

$$V = \left(\frac{1}{PA}\right) + \left(\frac{1}{ES}\right) + \left(\frac{1}{DT}\right)$$

2) Uma relação direta com Densidade de Fraturas (DF), Transmissividade do Aquífero (TA), Capacidade Específica (CE) e Recarga Potencial (RE), portanto:

$$V = \left[\left(\frac{1}{PA}\right) + \left(\frac{1}{ES}\right) + \left(\frac{1}{DT}\right) + CE + RE + DF + TA\right]$$

A aplicação do método, em ambientes aquíferos fissurais e cársticos, nos quais a variável Densidade de Fratura é extremamente relevante, a equação fica:

$$V = \left[\left[\left(\frac{1}{PA} \right) + \left(\frac{1}{ES} \right) + \left(\frac{1}{DT} \right) \right] + CE + RE + DF \right] \quad (1),$$

E em ambientes aquíferos granulares que dispõem de testes de bombeamento de qualidade para permitir o cálculo da Transmissividade do Aquífero com confiabilidade, a equação fica:

$$V = \left[\left[\left(\frac{1}{PA} \right) + \left(\frac{1}{ES} \right) + \left(\frac{1}{DT} \right) \right] + CE + RE + TA \right] \quad (2),$$

A equação descreve a vulnerabilidade a partir do somatório dos efeitos de proteção das parcelas representadas pelas variáveis: PA, ES e DT, inversamente relacionadas a acessibilidade e atenuação de contaminantes, adicionado aos efeitos na vulnerabilidade produzidos pelas parcelas representadas pelas variáveis - CE, RE, DF e TA - diretamente relacionadas a acessibilidade de contaminantes ao aquífero.

Considerando que os valores das variáveis são transformados em índices e, nas duas equações os resultados estão na mesma escala, eles podem ser comparados entre si, imprimindo um caráter universal ao novo método, aqui denominado de MAIA- Método de Avaliação da Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos.

5.3 SIMULANDO UMA MODELAGEM DA VULNERABILIDADE COM O MÉTODO MAIA

Aqui é simulada a modelagem da vulnerabilidade dos aquíferos, admitindo que os valores medidos das variáveis, foram colocados em uma escala equivalente, considerando o menor valor um e o maior dez, sendo os demais valores intermediários obtidos por meio de interpolação. As escalas são proporcionais e todas as equivalentes são de mesma amplitude.

Portanto, seja X, os valores das variáveis que apresentam uma relação direta com a vulnerabilidade: CE, RE, TA e DF e $Y = 1/X$, os valores das variáveis que apresentam uma relação inversa com a vulnerabilidade: PA, ES e DT cujos resultados encontram-se na (Tabela 22).

Tabela 22 - Variáveis com Relação Direta (X) e Variáveis com Relação Inversa (Y)

X	Y=1/X
x = 1	y = 1,00
x = 2	y = 0,50
x = 3	y = 0,33
x = 4	y = 0,25
x = 5	y = 0,20
x = 6	y = 0,16
x = 7	y = 0,14
x = 8	y = 0,12
x = 9	y = 0,11
x = 10	y = 0,10

Fonte: Maia (2011)

Com o objetivo de determinar os Índices de Vulnerabilidade, os valores das variáveis, X e Y da Tabela 22 foram substituídos nas equações 1 ou 2.

$$V = \left[\left(\frac{1}{PA} \right) + \left(\frac{1}{ES} \right) + \left(\frac{1}{DT} \right) \right] + CE + RE + DF \quad (1), \text{ ou}$$

$$V = \left[\left(\frac{1}{PA} \right) + \left(\frac{1}{ES} \right) + \left(\frac{1}{DT} \right) + CE + RE + TA \right] \quad (2),$$

Também foram calculados os valores: Máximo e Mínimo para a vulnerabilidade:

Um aquífero com um elevado fator de proteção e baixa vulnerabilidade, apresenta valores altos de PA, ES e DT e baixos para CE, RE, DF ou TA, a vulnerabilidade mínima fica:

$$V. \text{ Min.} = [(1/10)+(1/10)+(1/10)+1,0+1,0+1,0] = 0,10+0,10+0,10+1,0+1,0+1,0 = 3,3$$

O aquífero com baixo fator de proteção e alta vulnerabilidade, expresso por valores menores de PA, ES, DT e mais elevados para CE, RE, DF ou TA, a vulnerabilidade máxima fica:

$$V. \text{ Max.} = [(1/1)+(1/1)+(1/1)+10+10+10] = 1+1+1+10+10+10 = 33$$

A adoção das escalas equivalentes de mesma amplitude tem a vantagem de eliminar os fatores de ponderação dos métodos tradicionais. Conhecendo os valores mínimos e máximos, podemos estabelecer os limites para classificar os índices de vulnerabilidade, definindo os intervalos:

Baixa $\leq 10,5$
 10,5 < Média $\leq 18,0$
 18,0 < Alta $\leq 25,5$
 Extrema > 25,5,

Por exemplo:

$$\text{Vulnerab. Baixa} = [(1/1) + (1/1) + (1/1) + 2 + 2 + 1] = 1 + 1 + 1 + 2 + 2 + 1 = 8,0$$

$$\text{Vulnerab. Média} = [(1/3) + (1/4) + (1/4) + 6 + 5 + 5] = 0,33+0,25+0,25+6+5+5 = 16,83$$

$$\text{Vulnerab. Alta} = [(1/7) + (1/7) + (1/6) + 7 + 7 + 6] = 0,14+0,14+0,16+ 7+7+6 = 20,44$$

$$\text{Vulnerab. Extrema} = [(1/10)+(1/10)+(1/10)+10+10+10] = 0,1+0,1+0,1+10+10+10 = 30,3$$

Os índices de vulnerabilidade foram calculados com a aplicação na simulação das variáveis de relação direta e inversa na equação, sendo definida suas respectivas qualificações com base nos valores definidos anteriormente (Tabela 23).

Tabela 23 - Índices de Vulnerabilidade Obtidos na Simulação

X	Y=1/X	Índices de Vulnerabilidade
1	1	6,00
2	0,5	7,50
3	0,33	9,99
4	0,25	12,75
5	0,20	15,60
6	0,16	18,48
7	0,14	21,42
8	0,12	24,36
9	0,11	27,33
10	0,10	30,30

Fonte: Maia (2011)

Com o objetivo de examinar a natureza das variáveis, estas foram correlacionadas, por meio de gráfico com os índices de vulnerabilidade.

As variáveis PA, ES e DT apresentam uma relação inversa com a vulnerabilidade, quando seus valores aumentam, também aumentam os fatores de proteção do aquífero e a vulnerabilidade diminui (Figura 10).

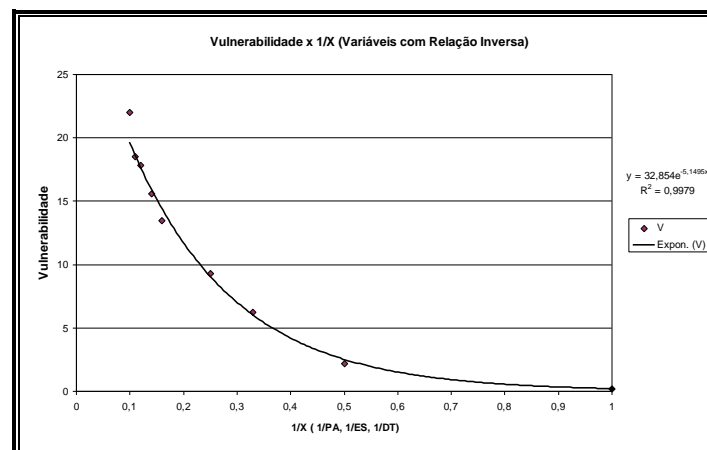


Figura 10 - Índices de Vulnerabilidade X Variáveis com Relação Inversa
 Fonte: Maia (2011)

As variáveis; CE, RE, TA e DF apresentam uma relação direta com a vulnerabilidade, quando seus valores aumentam, diminuem os fatores de proteção do aquífero e a vulnerabilidade aumenta (Figura 11).

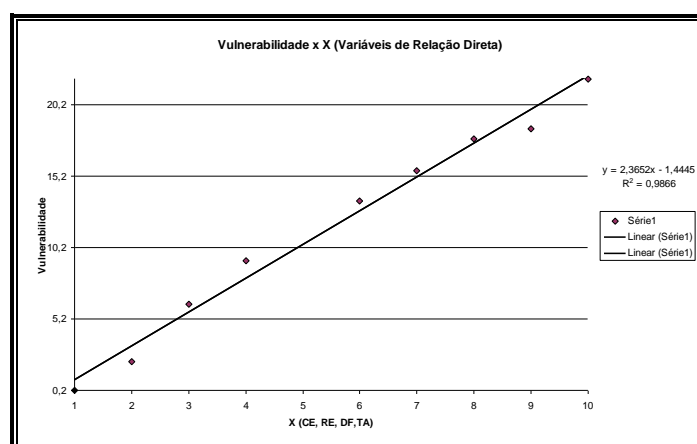


Figura 11- Índices de Vulnerabilidade X (Variáveis com Relação Direta)
 Fonte: Maia (2011)

A partir da interpolação dos dados pontuais das variáveis determinadas pela equação são produzidos os diversos níveis de informações espaciais que podem ser integradas, por meio de tecnologia GIS para determinar os índices e gerar o mapa de vulnerabilidade MAIA de acordo com os procedimentos a seguir (Figura 12).

5.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE ALGUNS TERMOS DA EQUAÇÃO

Aqui são feitas considerações sobre dificuldades na obtenção de algumas variáveis, a substituição de outras na equação, a superposição de efeitos de algumas delas e, por último, é apresentada a estratégia adotada para eliminar os fatores de ponderação usados nos métodos tradicionais.

Nos levantamentos de dados para aplicação da equação verificou-se que alguns termos apresentaram problemas na obtenção como, por exemplo, a Transmissividade (TA) e Densidade de Fratura (DF). Apesar dos dados de Densidade de Fratura (DF) dos aquíferos fissurais e cársticos ainda não estarem levantados, não está descartada a sua utilização futura quando eles estiverem disponíveis.

Não foi possível contar com a variável Densidade de Fratura (DF), extremamente importante para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos fissurais e cársticos. Sua determinação envolve a elaboração de uma análise tectônica estrutural com a finalidade de cartografar as estruturas rúpteis favoráveis a acumulação de água em todo o Estado da Bahia. Trata-se de um trabalho de

grande importância, mas que vai demandar tempo para ser realizado. Apesar dessa dificuldade, também não está descartada a sua utilização futura quando os dados estiverem disponíveis.

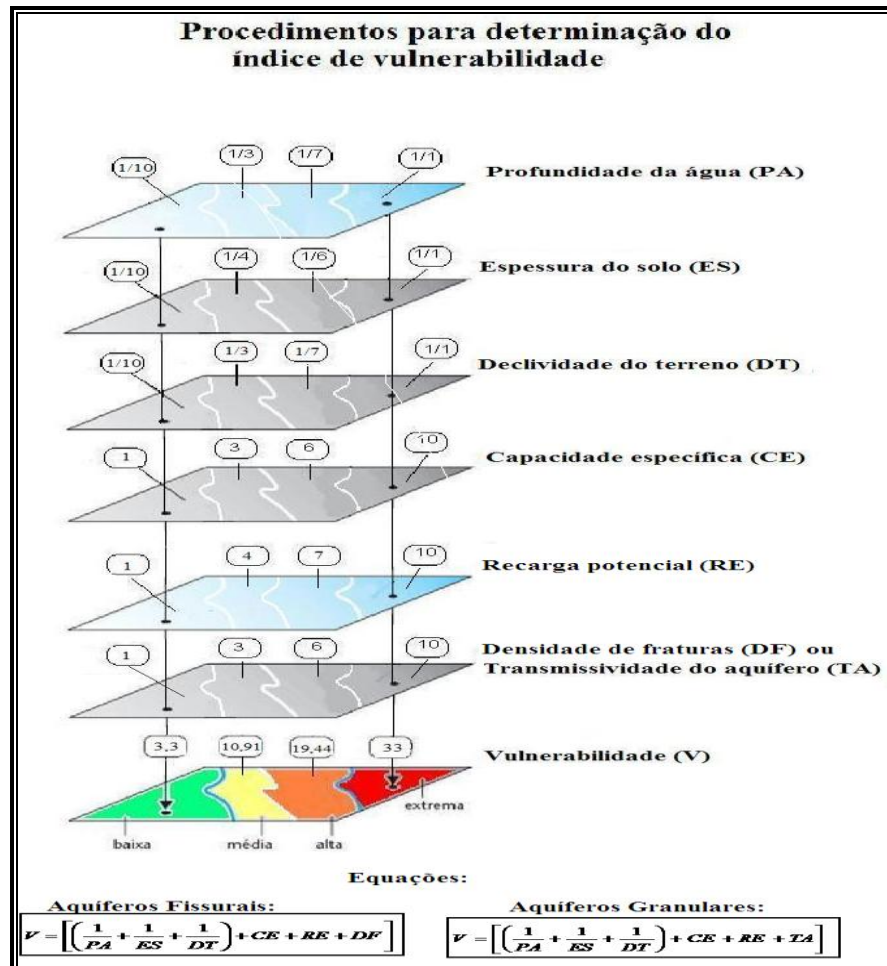


Figura 12 - Modelo para Determinar os Índices de Vulnerabilidade
 Fonte: Maia (2011) adaptado de Foster et al (2006)

A qualidade dos testes de bombeamento dos aquíferos fissurais e cársticos realizados para dimensionar e posicionar as bombas nos poços comprometeu a determinação das variáveis, Transmissividade (TA) e Coeficiente Hidráulico (CH) nos aquíferos fissurais e cársticos. O cálculo dessas variáveis foi com o método de recuperação de Cooper e Jacob (RODRIGUES, 2004).

Os resultados em vermelho estão discrepantes com as vazões e rebaixamentos nos poços e, portanto, pouco confiáveis. Como esses resultados foram utilizados para calcular o coeficiente hidráulico, por extensão os valores encontrados também não são confiáveis (Tabela 24)

Tabela 24 – Determinação da Transmissividade e do Coeficiente Hidráulico

Poço	Identificação	Q	NE	ND	TA	CH
1	2-349/84	2,64	97,00	131,00	6,84	0,000036
2	1-3235/85	3,74	4,32	52,63	1,29	0,000005
3	1-2263/84	0,57	0,00	53,13	3,09	0,000012
4	1-5371	7,99	100,64	156,46	2,25	0,000005
5	2-457	10,98	89,76	121,25	3,73	0,000011
6	1-1207	14,94	41,55	51,86	63,29	0,000162
7	2-1866	0,82	108,75	136,61	2,46	0,000008
8	1-1426/82	0,64	113,25	181,15	1,73	0,000006
9	1-2190/84	4,80	23,06	63,84	3,76	0,000007
10	2-2308	3,38	25,90	114,2	1,50	0,000002
11	1-2467/84	3,19	84,40	132,00	17,27	0,000095
12	1-5404/93	0,79	79,75	174,00	1,88	0,000004
13	2-555/84	1,80	123,65	136,46	11,56	0,000065
14	2-1318	2,30	128,70	149,49	5,93	0,000022
15	1-1266/81	1,11	0,00	57,80	5,45	0,000022
16	1-232/81	2,01	63,4	81,24	5,45	0,000049
17	2-2055	37,71	4,54	6,56	54,49	0,000201
18	1.318/82	131,97	50,18	80,20	16,45	0,000025
19	1.010/80	186,12	19,90	66,92	11,41	0,000010
20	1.338/82	99,00	54,78	87,98	9,27	0,000013

Fonte: Maia (2011)

A utilização da Condutividade Hidráulica foi descartada porque a sua correlação com a Transmissividade revelou um coeficiente de correlação elevado (0,868), sinalizando para uma superposição do efeito de proteção das duas variáveis, o que faz com que uma ou outra possa ser aplicada na equação. Neste caso, a melhor opção é a aplicação Transmissividade (TA) na equação do novo método, em ambientes aquíferos granulares, onde os testes de bombeamento são de boa qualidade (Figura 13).

A utilização do Grau de Confinamento inicialmente foi cogitada, porém o fato da mesma não ser medida como as demais variáveis selecionadas, mas determinada de forma subjetiva, sua aplicação na equação foi descartada, porém nada impede que decorrente de necessidades específicas ela possa ser agregada.

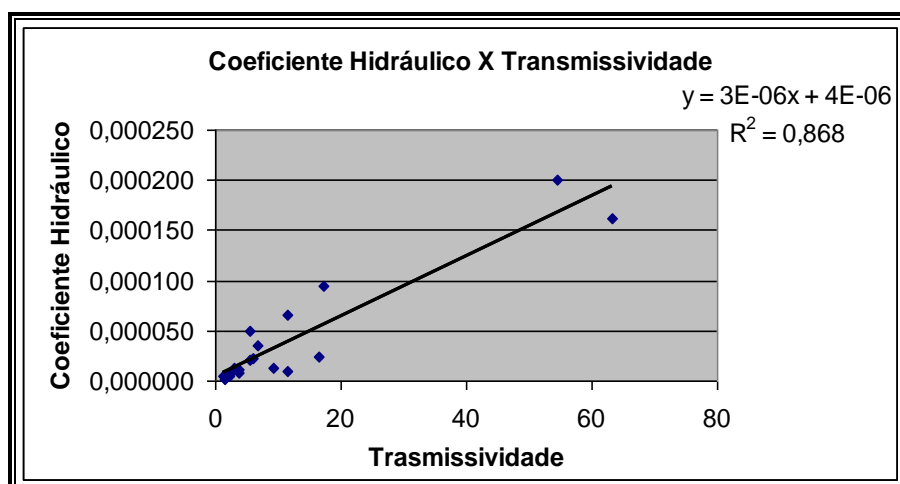


Figura 13 - Correlação entre o Coeficiente Hidráulico e a Transmissividade
Fonte: Maia (2011)

A utilização da Transmissividade (TA) no cálculo da vulnerabilidade em aquíferos fissurais e cársticos não é recomendada, devido a qualidade dos testes de bombeamento, porém sua utilização em ambientes aquíferos granulares, onde os testes de bombeamento são de melhor qualidade, não deve ser descartada devido a importância dessa variável.

As variáveis, profundidade da água e a espessura do solo são variáveis distintas que não apresentam qualquer superposição de efeitos. A espessura do solo pode até, eventualmente, coincidir com a profundidade do nível estático, porém os efeitos de proteção são diferentes.

A matriz de correlação das variáveis utilizadas mostra que não está ocorrendo qualquer superposição nos efeitos de proteção das variáveis na equação do novo método. Cada variável medida representa somente uma única propriedade do aquífero relacionada com a vulnerabilidade (Tabela 25).

Tabela 25 - Matriz de Correlação das Variáveis

	PA	ES	DT	CE	RE
PA	1	0,231	0,214	0,046	0,026
ES		1	0,242	0,001	0,087
DT			1	0,054	0,124
CE				1	0,014
RE					1

Fonte: Maia (2011)

As variáveis são medidas em unidades de natureza distinta, por exemplo, a Profundidade da Água (m); Espessura do Solo (m); Densidade de Fraturas (m/km^2); Capacidade Específica exemplo, o valor da Capacidade Específica de um determinado aquífero, dados reais, varia de ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$). Elas também apresentam intervalos de valores com diferentes amplitudes, por 0,003 e 2,03 ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$), enquanto que o valor da Profundidade da Água para o mesmo aquífero, varia no intervalo de 1,04 m até mais de 100 m. Essa diferença de amplitude nos valores, provoca impactos diferenciados nas equações e faz com que os autores dos métodos tradicionais utilizem os fatores de ponderação.

Considerando que as frações equivalentes representam a mesma parte do todo, os valores das variáveis foram colocados em uma escala equivalente, de forma a evitar o uso de ponderações subjetivas para realçar efeitos de algumas delas nas equações. As escalas são proporcionais e todas as equivalentes são de mesma amplitude. Os valores das variáveis relacionadas a vulnerabilidade foram transformados em índices, considerando o menor valor de cada variável um e o maior dez e os valores intermediários foram obtidos por meio de interpolação.

Levando-se em conta a versatilidade e o caráter modular do método que permite agregar outras variáveis, nos trabalhos de detalhe, principalmente em aquíferos granulares, onde é possível medir as taxas de infiltração com facilidade, esta variável deve ser utilizada para melhorar a precisão do índice MAIA.

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

As variáveis foram selecionadas para compor a equação considerando: a forma de obtenção, essencialmente medida; os efeitos de proteção, acessibilidade e/ou atenuação; a relação com a vulnerabilidade, direta ou inversa e a natureza da variável, propriedade intrínseca do sistema.

As variáveis são características intrínsecas dos aquíferos relacionadas com a vulnerabilidade que apresentam com ela uma relação matemática direta ou inversa. A partir da análise das relações matemáticas que cada parcela imprime na proteção ou na vulnerabilidade dos aquíferos foi deduzida a equação do novo método.

O novo método apresenta características de um Modelo Análogo e Paramétrico que utiliza uma expressão matemática constituída por uma seleção de parâmetros indicadores de vulnerabilidade, cujos valores medidos no sistema aquífero interagem para produzir um índice de vulnerabilidade universal.

Além de selecionar somente variáveis que podem ser mensuradas para compor a equação, o método ainda apresenta outro diferencial que é o de evitar o uso de ponderações subjetivas para realçar ou minimizar os efeitos, com base na importância atribuída a cada uma delas nas equações.

Foi simulada uma modelagem da vulnerabilidade dos aquíferos utilizando os índices produzidos a partir dos valores medidos aplicados na equação, com a finalidade de entender os princípios e funcionalidades do novo método. Também foram feitas considerações sobre dificuldades na obtenção de algumas variáveis, a superposição de efeitos de algumas delas e a necessidade de substituir outras na equação.

6 APLICAÇÃO EXPERIMENTAL

Neste capítulo, foi escolhida uma área piloto, por comportar todos os tipos de aquíferos, para serem aplicados os métodos MAIA, DRASTIC, GOD, cujos índices foram comparados e correlacionados entre si com a finalidade de avaliar os resultados.

6.1 APLICAÇÃO NOS MUNICÍPIOS DE LENÇÓIS E LAGEDINHO

A aplicação experimental do novo método foi em uma área piloto, localizada nos municípios de Lençóis e Lagedinho selecionados estrategicamente por comportar todos os tipos de aquífero. Os dados de cerca de 20 poços foram pesquisados na área avaliada, sendo 12 em aquífero cárstico, 5 em metassedimentar e 4 no cristalino. Como não foram encontrados na área poços no aquífero granular, foram incluídos 3 poços de um aquífero granular da Bacia do Recôncavo para avaliar a aplicação do método em todos os tipos de aquíferos (Figura 14).

Os poços tubulares forneceram as variáveis: Profundidade da Água, Espessura do Solo, Declividade do Terreno, Capacidade Específica e a Recarga Potencial é a pluviosidade média anual. Não foi possível contar com a Densidade de Fraturas, por ainda não ter sido levantada e Transmissividade do Aquífero devido a qualidade dos testes de bombeamento.

As variáveis disponíveis foram aplicadas na equação modificada (Equação 3).

$$V = \left[\left(\frac{1}{PA} + \frac{1}{ES} + \frac{1}{DT} \right) + CE + RE \right] \quad (3).$$

A escala de valores para qualificação do índice nesta aplicação foi obtida a partir da determinação dos valores, máximo e mínimo como descrito a seguir:

$$V \text{ min.} = \{[(1/10) + (1/10) + (1/10)] + 1,00 + 1,00\} = 0,1 + 0,1 + 0,1 + 1,0 + 1,0 = 2,3$$

$$V \text{ Max.} = \{[(1/1) + (1/1) + (1/1)] + 10 + 10\} = 1,0 + 1,0 + 1,0 + 10 + 10 = 23,0$$

Foram calculados os limites para qualificação da vulnerabilidade:

- Baixa $\leq 7,5$;
- $7,5 < \text{Média} \leq 12,5$;
- $12,5 < \text{Alta} \leq 17,5$;
- $17,5 < \text{Extrema} < 23,0$.

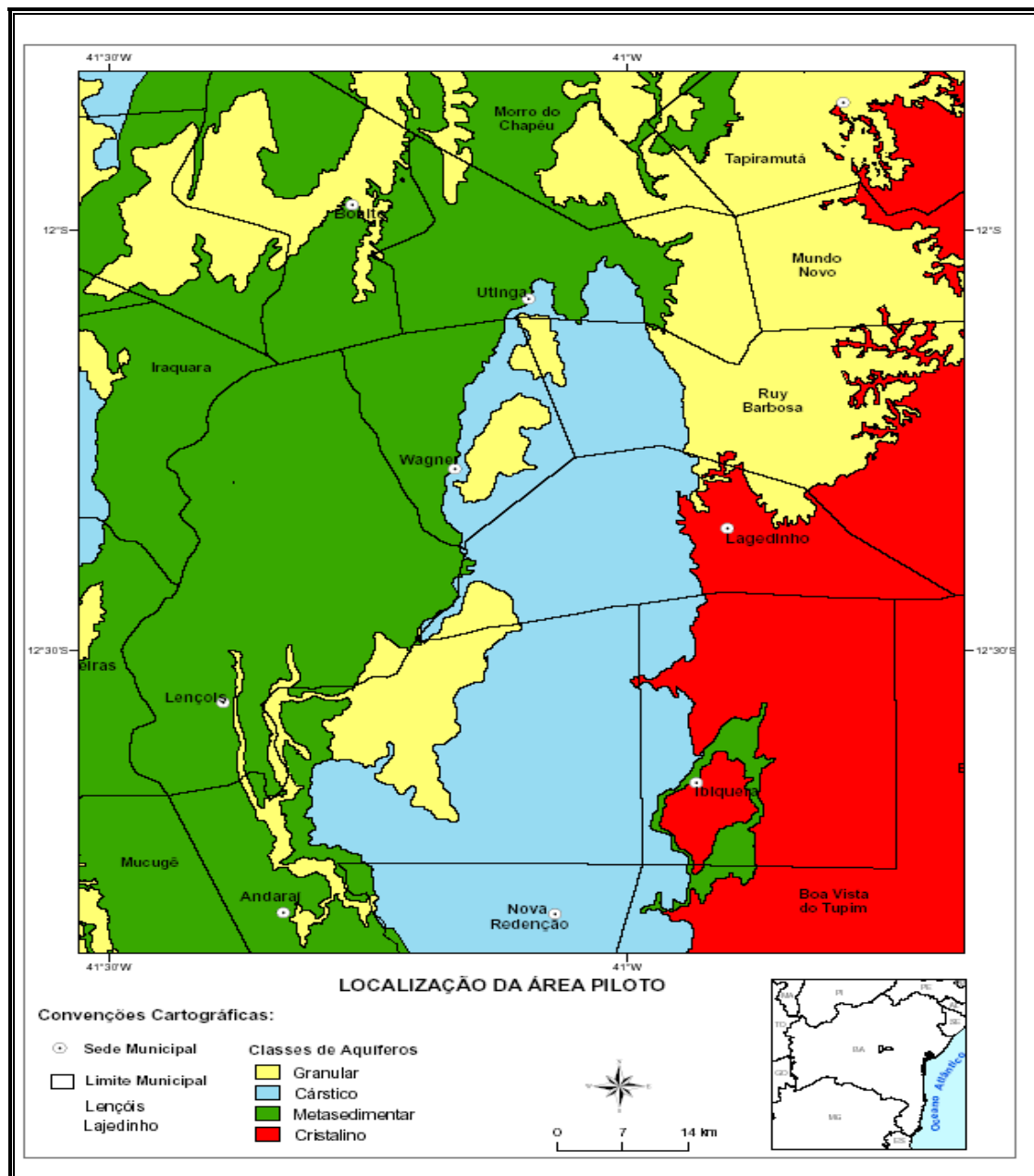


Figura 14 – Área Piloto para Aplicação Experimental nos Municípios de Lençóis e LagedinHO

Fonte: Modificado de Maia *et al.*(2009)

As variáveis requisitadas para o cálculo dos índices de vulnerabilidade MAIA foram aplicadas na equação e os resultados encontram-se a seguir (Tabela 26).

Tabela 26 - Cálculo do Índice de Vulnerabilidade MAIA na Área Piloto

Poço	Aquífero	PAi	ESi	DTi	CEi	REi	I.MAIA	Qualificação
1	Carst.	1	1,1	1,3	1,01	1,2	5,7	Baixa
2	Crist.	2,99	3,8	1,9	1,01	1	10,6	Média
3	Crist.	10	4	1,4	1	1	17,5	Alta
4	Met.	1	10	2,2	1,03	1,2	15,4	Alta
5	Carst./Met.	1,01	1	1,1	1,07	1,2	5,4	Baixa
6	Carst./Met.	1,13	5,3	1,5	1,28	1,6	10,8	Média
7	Carst./Met.	0,99	4,4	1,8	1	1,2	9,4	Média
8	Carst./Met.	0,99	0,9	10	1	1,6	14,5	Alta
9	Carst/Met.	1,3	1,1	1,6	1,02	1	6,1	Baixa
10	Crist.	10	10	1	1	1	23	Extrema
11	Carst/Met.	1,26	10	1,1	1,01	1,8	15,1	Alta
12	Carst./Met.	1,02	1,2	2,6	1,01	1,2	7	Baixa
13	Cárst.	1,02	1	3,2	1	1,8	8	Média
14	Cárst.	0,98	1,4	6,1	1,03	1,8	11,3	Média
15	Cárst.	0,99	1	2,7	1	1,8	7,5	Baixa
16	Cárst.	0,98	1	3,5	1,02	1,6	8,1	Média
17	Crist.	10	6,9	1,1	1	1	19,9	Extrema
18	Cárst.	1,05	1,1	2,1	1,02	1,6	6,9	Baixa
19	Met.	1,13	1,3	1,1	10	2,2	15,6	Alta
20	Cárst.	2,89	1,5	3	4,63	3,7	15,7	Alta
21	Granul.	1,09	0,9	6,3	1,85	10	20,1	Extrema
22	Granul.	1,36	1,1	2,3	1,78	10	16,5	Alta
23	Granul.	1,07	1,3	3	1,58	10	16,9	Alta

Fonte: Maia (2011)

A partir das relações entre os fatores de proteção das variáveis e a vulnerabilidade, é possível avaliar o impacto que cada uma delas imprime ao cálculo e, constatar que os dados medidos nos poços e nos aquíferos estão coerentes com os índices obtidos na modelagem. A correlação das variáveis com o índice MAIA conduz a percepção de que o novo método é eficaz na determinação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos (Tabela 27).

Os índices de vulnerabilidade Baixos observados nos poços 1, 5, 9, 12,15 e 18 é o resultado da integração dos efeitos de proteção determinados por valores elevados das variáveis com relação inversa com a vulnerabilidade, tais como: PA entre 23,06 e 114,6 m; ES entre 33,7 e 47 m; DT entre 0,62 e 2,56 % e valores baixos para as variáveis que apresentam uma relação direta com a vulnerabilidade, tais como a CE com valores entre 0,02 e 2,56 m³/h/m e RE entre 680 e 750 mm.

Os índices de vulnerabilidade Extremos determinados nos poços 10, 17 e 21 é o resultado do somatório dos fatores de proteção representados pelos valores baixos das variáveis com relação inversa com a vulnerabilidade, tais como: PA entre 0,99 e 50,18 m; ES entre 2,3 e 60 m; DT entre 0,23 e 3,04 % e valores elevados das variáveis com relação direta com a vulnerabilidade, tais como a CE entre 0,02 e 4,39 m³/h/m e RE entre 650 e 1800 mm.

As demais qualificações resultaram na integração dos valores das variáveis que compõe a equação, na qual as variáveis com relação inversa, relacionadas à atenuação e acessibilidade a contaminantes, se somam aos efeitos das variáveis com relação direta, relacionadas à acessibilidade de contaminantes ao aquífero (Tabela 25).

Observa-se a sensibilidade do método em avaliar a vulnerabilidade em um mesmo tipo de aquífero. Os resultados estão vinculados somente as variáveis da equação e não apresentam qualquer relação com o tipo litológico. Os aquíferos cristalinos apresentam vulnerabilidade que varia de baixa a extrema e os cársticos e os cársticos/ metassedimentares de Baixa a Alta.

Os índices determinados variam de um mínimo de 5,4, no poço 5 com uma qualificação de baixa vulnerabilidade em um aquífero cárstico/metassedimentar a vulnerabilidade extrema com índice de 20,1 no poço 21 em um aquífero granular.

Os índices de vulnerabilidade determinados com o novo método estão vinculados as variáveis da equação e, portanto, dissociados da litologia do aquífero. O mesmo tipo de aquífero apresenta diferentes índices, por exemplo: os aquíferos cristalinos apresentam índices médio, alto e extremo, nos poços 2, 3 e 17 e os aquíferos cársticos./metasedimentares apresentam índices baixo, médio e alto, nos poços 5, 6, e 8.

Tabela 27 - Correlação das Variáveis Utilizadas no Método com o Índice MAIA

Poço	Aquífero	PA	ES	DT	CE	RE	I. MAIA	Qualif.
1	Carst.	97	38	1,79	0,078	680	5,7	Baixa
2	Crist.	4,32	6	1,03	0,077	650	10,6	Média
3	Crist.	0,99	5,5	1,51	0,01	650	17,5	Alta
4	Met.	100,6 4	2	0,82	0,143	680	15,4	Alta
5	Carst./Me	89,76	46	2,56	0,349	680	5,4	Baixa
6	Carst./Me t	41,55	4	1,46	1,45	730	10,8	Média
7	Carst./Me t	108,7 5	5	1,07	0,029	680	9,4	Média
8	Carst./Me	113,2 5	74	0,14	0,009 5	730	14,5	Alta
9	Carst/Met.	23,06	38	1,25	0,118	650	6,1	Baixa
10	Crist.	0,99	2	3,04	0,007 1	650	23,0	Extrema
11	Carst/Met	25,9	2	2,63	0,038	750	15,1	Alta
12	Carst./Me	84,4	33,7	0,66	0,067	680	7,0	Baixa
13	Cárst.	79,75	48	0,51	0,008 3	750	8,0	Média
14	Cárst.	123,6 5	23	0,24	0,14	750	11,3	Média
15	Cárst.	114,6	47	0,62	0,02	750	7,5	Baixa
16	Cárst.	128,7	51	0,45	0,11	730	8,1	Média
17	Crist.	0,99	3	2,67	0,02	650	19,9	Extrema
18	Cárst.	63,4	41	0,87	0,11	730	6,9	Baixa
19	Met.	40,46	30	2,68	46,31	800	15,6	Alta
20	Cárst.	4,54	22	0,54	18,66	1000	15,7	Alta
21	Granul.	50,18	60	0,23	4,39	1800	20,1	Extrema
22	Granul.	19,9	40	0,76	4,01	1800	16,5	Alta
23	Granul.	54,78	28	0,56	2,98	1800	16,9	Alta

Fonte: Maia (2011)

(PA)= Profundidade da Água; (ES)= Espessura do Solo (DT)= Declividade do Terreno,
(CE)= Capacidade Específica e (RE)= Recarga Potencial.

A matriz de correlação entre as variáveis utilizadas indica que não está ocorrendo qualquer superposição nos efeitos de proteção dos aquíferos na equação do novo método. Cada variável medida representa somente uma única propriedade do aquífero relacionada com a vulnerabilidade (Tabela 28).

Tabela 28 - Matriz de Correlação das Variáveis Utilizadas no Cálculo do Índice MAIA

	PA	ES	DT	CE	RE
PA	1	0,231	0,214	0,046	0,026
ES		1	0,242	0,001	0,087
DT			1	0,054	0,124
CE				1	0,014
RE					1

Fonte: Maia (2011)

Também foram calculados para fins de comparação, os índices dos métodos DRASTIC, GOD, cujos resultados foram correlacionados entre si com a finalidade de verificar a relação entre os índices de cada um dos métodos (Tabela 29).

Considerando que as variáveis utilizadas em cada método não são as mesmas, obtidas de diferentes formas, aplicadas em equações distintas e, que ainda utilizam fatores de ponderação para realçar ou minimizar os seus efeitos, os índices foram bastante discrepantes.

Observa-se que ocorre uma tendência de repetir os valores dos índices nos dois métodos, de forma mais acentuada no GOD e um pouco menos no DRASTIC, decorrente da utilização de variáveis, vinculadas ao tipo de rocha e de solo, determinadas por meio de tabela. Enquanto que no MAIA isso não ocorre, pois os índices estão relacionados somente as variáveis que compõe a equação, denotando uma maior sensibilidade do método em descrever a vulnerabilidade.

Os índices obtidos com a aplicação dos três métodos foram correlacionados, por meio de gráficos representados pelas Figuras 17, 18 e 19, e os seus coeficientes de correlação não mostram qualquer relação entre eles. Provavelmente, o resultado é decorrente da aplicação de diferentes variáveis em equações distintas.

Por se tratar de dois métodos paramétricos, apesar de baixa ($R^2 = 0,3576$), a correlação dos índices de vulnerabilidade MAIA com o DRASTIC foi a melhor das três. E a pior correlação foi entre os índices MAIA e GOD com ($R^2 = 0,1402$).

Tabela 29 – Comparação dos Índices de Vulnerabilidade DRASTIC, GOD e MAIA

Poço	DRASTIC	Qualificação	GOD	Qualificação	MAIA	Qualificação
1	86	Insignificante	0,5	Alta	5,7	Baixa
2	109	Muito Baixo	0,4	Média	10,6	Média
3	116	Muito Baixo	0,5	Alta	17,5	Alta
4	61	Insignificante	0,2	Baixa	15,4	Alta
5	76	Insignificante	0,1	Baixa	5,4	Baixa
6	55	Insignificante	0,3	Média	10,8	Média
7	80	Insignificante	0,1	Baixa	9,4	Média
8	80	Insignificante	0,1	Baixa	14,5	Alta
9	40	Insignificante	0,2	Baixa	6,1	Baixa
10	97	Insignificante	0,2	Baixa	23,0	Extrema
11	88	Insignificante	0,2	Baixa	15,1	Alta
12	90	Insignificante	0,1	Baixa	7,0	Baixa
13	90	Insignificante	0,1	Baixa	8,0	Média
14	84	Insignificante	0,1	Baixa	11,3	Média
15	86	Insignificante	0,1	Baixa	7,5	Baixa
16	84	Insignificante	0,1	Baixa	8,1	Média
17	116	Muito Baixo	0,2	Baixa	19,9	Extrema
18	55	Insignificante	0,1	Baixa	6,9	Baixa
19	73	Insignificante	0,2	Baixa	15,6	Alta
20	144	Alto	0,2	Baixa	15,7	Alta
21	123	Baixo	0,4	Média	20,1	Extrema
22	143	Moderado	0,6	Alta	16,5	Alta
23	123	Baixo	0,3	Média	16,9	Alta

Fonte: Maia (2011)

Os resultados apontam para uma baixa correlação entre os índices DRASTIC e GOD com um coeficiente de correlação $R^2 = 0.2625$ (Figura 15).

A correlação do índice de vulnerabilidade MAIA com o GOD também apresentou um baixo coeficiente de correlação, $R^2 = 0,1402$ (Figura 17).

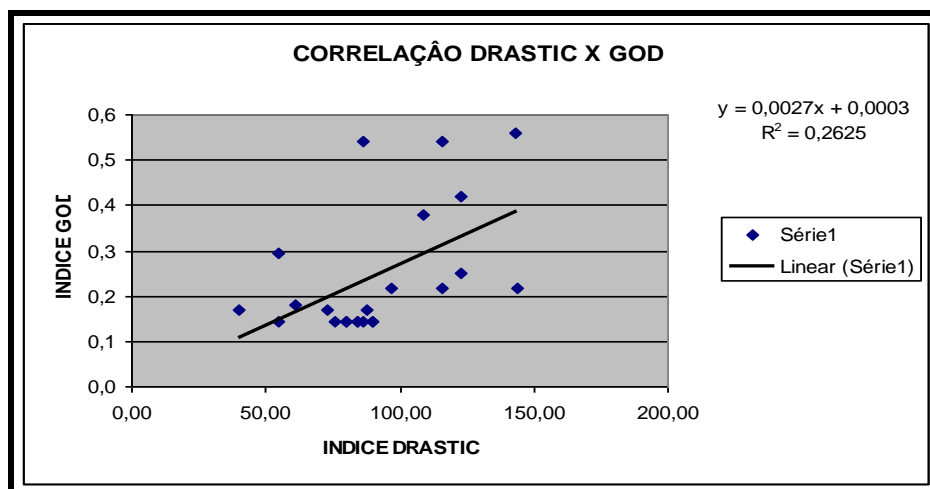


Figura 15 - Correlação entre os Índices DRASTIC e GOD
Fonte: Maia (2011)

A correlação entre os índices de vulnerabilidade MAIA com os índices do DRASTIC foi baixa com um coeficiente de correlação, $R^2 = 0,3576$ (Figura 16).

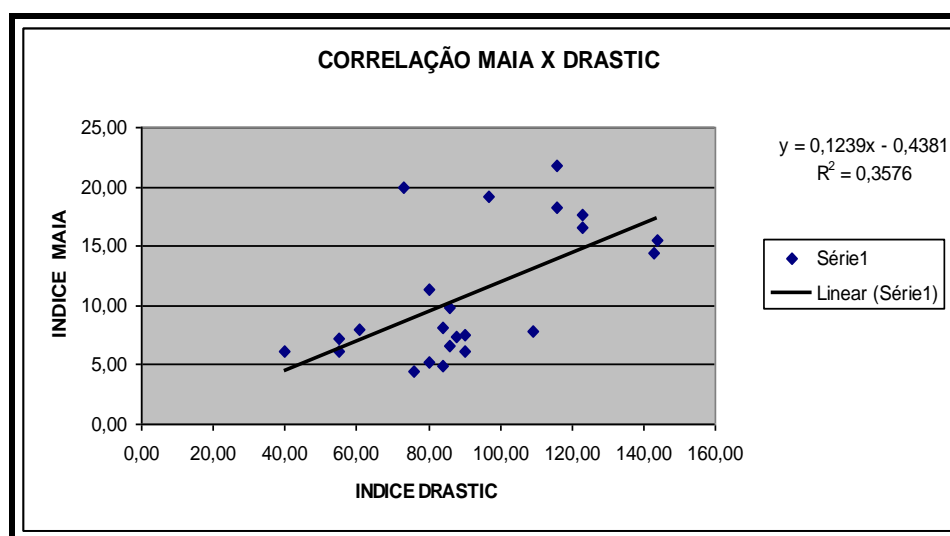


Figura 16 - Correlação entre os Índices MAIA e DRASTIC
Fonte: Maia (2011)

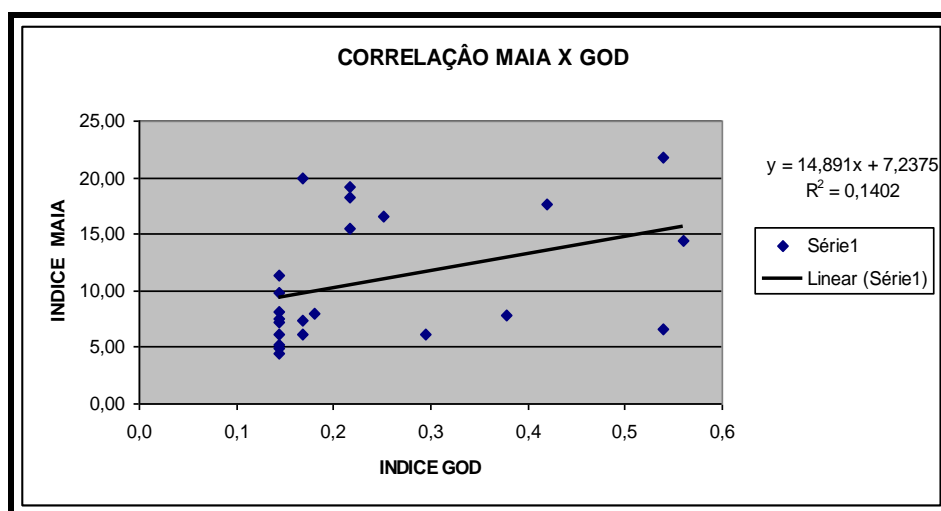


Figura 17 - Correlação entre os Índices MAIA e GOD

Fonte: Maia (2011)

6.2 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

A aplicação experimental mostrou que o método é adequado para avaliar a vulnerabilidade em escala regional, pois se trata de um método universal que permite a comparação da vulnerabilidade de todos os tipos de aquíferos do mesmo lugar ou de lugares diferentes.

Os índices de vulnerabilidade determinados com o novo método estão vinculados as variáveis da equação e, portanto dissociados da litologia do aquífero. O mesmo tipo de aquífero apresenta diferentes índices, por exemplo: os aquíferos cristalinos apresentam índices: médio, alto e extremo, nos poços 2, 3 e 17 e os aquíferos cársticos/metasedimentares apresentam índices: baixo, médio e alto, nos poços 5, 6, e 8.

A relação entre os fatores de proteção das variáveis e a vulnerabilidade permitiu avaliar o impacto que cada uma delas imprime ao cálculo e constatar que os dados medidos nos poços e nos aquíferos estão coerentes com os índices obtidos na modelagem.

Não ocorreu qualquer superposição nos efeitos de proteção das variáveis na equação do novo método, cada variável medida representa somente uma única propriedade do aquífero relacionada com a vulnerabilidade.

É notável a sensibilidade do novo método em avaliar a vulnerabilidade em um mesmo tipo de aquífero, pois os resultados estão vinculados somente as variáveis da equação e não apresentam qualquer relação com o tipo litológico.

O índice DRASTIC variou de 40 a 143, apresentando qualificações de predominantemente Insignificantes e Muito Baixas, enquanto que o GOD variou de 0,1 a 0,6, predominantemente Baixas e Médias. Esse resultado foi obtido em uma diversidade muito grande de aquíferos. O índice MAIA variou de 5,4 a 23, com todas as qualificações que variam de Baixas a Extremas.

Os índices obtidos com a aplicação dos três métodos foram correlacionados, por meio de gráficos, e os coeficientes de correlação não mostram qualquer relação entre eles, provavelmente o resultado é decorrente da aplicação de diferentes variáveis em equações distintas.

7 CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE NO MUNICÍPIO DE ARACATU

Neste capítulo são apresentados os resultados da cartografia da vulnerabilidade dos aquíferos no município de Aracatu utilizando os métodos MAIA, DRASTIC E GOD, cujos índices foram correlacionados entre si e com as concentrações de nitrato, por meio de mapas e gráficos, para avaliar o comportamento de cada método.

7.1 CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE COM O MÉTODO MAIA

Os valores das variáveis foram colocados na escala equivalente de um a dez, conforme preconizado pelo método e aplicados na equação para o cálculo do índice (Tabela 30).

A pesquisa realizada na dissertação de mestrado do autor foi sobre “Meio Ambiente e Potencialidades Hídricas na Região de Aracatu - Sudoeste da Bahia” (MAIA, 2005), cuja disponibilidade de dados facilitou a escolha da área e possibilitou complementar o estudo anterior.

A análise das relações entre os índices de vulnerabilidade com os fatores de proteção do aquífero, representados pelos valores elevados das variáveis de relação inversa com os valores baixos das variáveis de relação direta, permite constatar que a modelagem está coerente e que os índices descrevem a vulnerabilidade a partir das variáveis medidas no sistema aquífero aplicadas na equação do método (Tabela 28).

Os índices de vulnerabilidade Baixos observados nos poços: Meleiro (1), Sede III (9), Sede V (11), Eixo Serra II (12), Passagem do Lagedo II (13), Patos (14), Serra Negra (19), Caetano e Paris do Matias (20), é o resultado da integração dos efeitos de proteção determinados por valores elevados das variáveis com relação inversa com a vulnerabilidade, tais como: PA entre 0 e 5,87 m; ES entre 1 e 3 m; DT entre 1 e 13,4 % e valores baixos para as variáveis que apresentam uma relação direta com a vulnerabilidade, tais como a CE com valores entre 0,0013 e 0,1363 m³/h/m e RE entre 603,6 e 632 mm (Tabela 31).

Os índices de vulnerabilidade Altos determinados nos poços: Pimenta (4), Faz. Pau Ferro (5), Faz. Manoel Velho (6), Faz. Duas Irmãs (7), Algodão (8), Pé de Serra (10), Zacarias (15) e Lagoa de Santana (16), é o resultado do somatório dos valores baixos das variáveis com relação inversa, tais como: PA entre 0,44 e 37,86 m; ES entre 1 e 2 m; DT entre 1,3 e 10,6 % com os valores elevados das variáveis com relação direta com a vulnerabilidade, tais como a CE entre 0,0457 e 0,8911 m³/h/m e RE entre 603,6 e 688,6 mm (Tabela 31).

Os índices de Vulnerabilidade médios calculados resultaram da integração dos valores das variáveis que compõe a equação, na qual as variáveis com relação inversa, relacionadas a atenuação e acessibilidade de contaminantes, se somam aos efeitos de proteção das variáveis com relação direta, relacionadas a acessibilidade de contaminantes ao aquífero (Tabela 31).

Tabela 30 - Cálculo do Índice de Vulnerabilidade MAIA no Município de Aracatu

Poço	Localidade	X	Y	Pai	ESi	DTi	1/PAi	1/ESi	1/DTi	CEi	PLi	Ind. Maia	Classificação
1	Meleiro	-14,47806	-41,53694	1,238	5,500	1,332	0,808	0,182	0,751	1,541	1,010	4,3	Baixa
2	Faz.Fundão	-14,43250	-41,34056	1,666	3,250	10,000	0,600	0,308	0,100	2,415	8,519	11,9	Média
3	Baixa Escura	-14,37500	-41,29111	1,475	1,000	3,511	0,678	1,000	0,285	1,710	8,519	12,2	Média
4	Pimenta	-14,54750	-41,43500	4,428	3,250	1,480	0,226	0,308	0,675	9,020	4,018	14,2	Alta
5	Faz. Pau Ferro	-14,38889	-41,30806	1,815	3,250	6,087	0,551	0,308	0,164	2,085	10,012	13,1	Alta
6	Faz. Manoel Velho	-14,45639	-41,33806	2,150	1,000	1,877	0,465	1,000	0,533	1,450	10,012	13,5	Alta
7	Faz. Duas Irmãs	-14,30250	-41,32361	1,549	1,000	2,075	0,646	1,000	0,482	2,366	8,519	13,0	Alta
8	Algodão	-14,41667	-41,38500	5,754	1,000	1,728	0,174	1,000	0,579	9,998	1,010	12,8	Alta
9	Sede III	-14,41667	-41,48250	1,314	3,250	2,768	0,761	0,308	0,361	1,218	2,705	5,4	Baixa
10	Pé de Serra	-14,42611	-41,22694	9,999	1,000	2,223	0,100	1,000	0,450	2,764	10,012	14,3	Alta
11	Sede V	-14,40528	-41,45833	1,114	1,000	2,768	0,898	1,000	0,361	1,355	2,705	6,3	Baixa
12	Eixo Serra II - Lg Represa	-14,26000	-41,44417	2,169	3,250	1,000	0,461	0,308	1,000	1,792	2,514	6,1	Baixa
13	Passagem do Lagedo II	-14,37194	-41,56528	1,606	5,500	1,307	0,623	0,182	0,765	1,871	2,514	6,0	Baixa
14	Patos	-14,21194	-41,53389	2,395	3,250	2,917	0,417	0,308	0,343	2,365	2,514	5,9	Baixa
15	Zacarias	-14,44583	-41,22222	1,105	3,250	3,808	0,905	0,308	0,263	1,523	10,012	13,0	Alta
16	Lagoa de Santana	-14,33056	-41,21250	1,592	1,000	1,877	0,628	1,000	0,533	2,116	10,012	14,3	Alta
17	Várzea da Pedra	-14,27139	-41,34611	1,169	1,000	4,848	0,856	1,000	0,206	1,031	5,522	8,6	Média
18	Serra Negra	-14,27528	-41,42111	1,899	5,500	1,579	0,527	0,182	0,633	6,541	2,514	10,4	Média
19	Caetano	-14,27417	-41,38500	1,000	3,250	7,474	1,000	0,308	0,134	1,000	4,018	6,5	Baixa
20	Paris do Matias	-14,16278	-41,44583	1,951	3,250	1,778	0,513	0,308	0,563	1,312	1,010	3,7	Baixa
21	Várzea da Pedra VI	-14,27361	-41,17139	1,171	10,000	1,332	0,854	0,100	0,751	1,264	5,522	8,5	Média
22	Várzea da Pedra III	-14,27389	-41,17111	4,344	3,250	5,542	0,230	0,308	0,180	1,418	5,522	7,7	Média

Fonte: Maia (2011)

Onde: PA = Profundidade da água; ES = Espessura do Solo; DT = Declividade do Terreno; CE = Capacidade Específica e RE = Recarga Potencial e PAi; ESi; DTi; CEi e REi, seus respectivos Índices que de acordo com os princípios do método, variam de 1 a 10.

Tabela 31 - Correlação das Variáveis com os Índices de Vulnerabilidade MAIA

Nº de ordem	PA	ES	DT	CE	RE	Ind. Maia	Classificação
	(m)	(m)	(%)	(m ² /h)	(mm)		
1	1	3	1	0,0548	603,6	4,29	Baixa
2	2,8	2	18,5	0,1412	674,5	11,94	Média
3	2	1	5,4	0,0715	674,5	12,19	Média
4	14,42	2	1,3	0,7944	632	14,25	Alta
5	3,43	2	10,6	0,1085	688,6	13,12	Alta
6	4,84	1	2,1	0,0457	688,6	13,46	Alta
7	2,31	1	2,5	0,1363	674,5	13,01	Alta
8	20	1	1,8	0,8911	603,6	12,76	Alta
9	1,32	2	3,9	0,0229	619,6	5,35	Baixa
10	37,86	1	2,8	0,1757	688,6	14,33	Alta
11	0,48	1	3,9	0,0363	619,6	6,32	Baixa
12	4,92	2	0,33	0,0796	617,8	6,07	Baixa
13	2,55	3	0,95	0,0874	617,8	5,95	Baixa
14	5,87	2	4,2	0,1363	617,8	5,95	Baixa
15	0,44	2	6	0,0530	688,6	13,01	Alta
16	2,49	1	2,1	0,1116	688,6	14,29	Alta
17	0,71	1	8,1	0,0044	646,2	8,61	Média
18	3,78	3	1,5	0,5493	617,8	10,40	Média
19	1	2	13,4	0,0013	632	6,46	Baixa
20	4	2	1,9	0,0321	603,6	3,71	Baixa
21	0,72	5	1	0,0274	646,2	8,49	Média
22	14,07	2	9,5	0,0426	646,2	7,66	Média

Fonte: Maia (2011)

Como destacado por Auge (2004), os mapas de vulnerabilidade são denominados vulgarmente de semáforos, dado que a maioria utiliza as cores verde, amarelo e vermelho. Nos casos em que a classificação admite variações que vão de muito baixa e muito alta, recomenda-se a variação de tonalidades das cores na representação da vulnerabilidade, por exemplo: o verde escuro se aplica a vulnerabilidade muito baixa, o verde claro a baixa; o rosa a vulnerabilidade alta e o vermelho escuro a muito alta.

Os valores calculados, por meio da tabela Excel, foram espacializados, utilizando o método de interpolação krigagem (JAKOB, 2002), que utiliza o dado tabular e sua posição geográfica para calcular as interpolações de dados dispersos e pouco abundantes, com o software Surfer 8.0, gerando o mapa com os índices de vulnerabilidade MAIA (Figura 18).

O mapa apresenta índices de vulnerabilidade baixos no setor oeste do município, com direção NNE, gradando para índices de vulnerabilidade média na mesma direção no setor central, até atingir os índices mais altos no setor Leste (Figura 18).

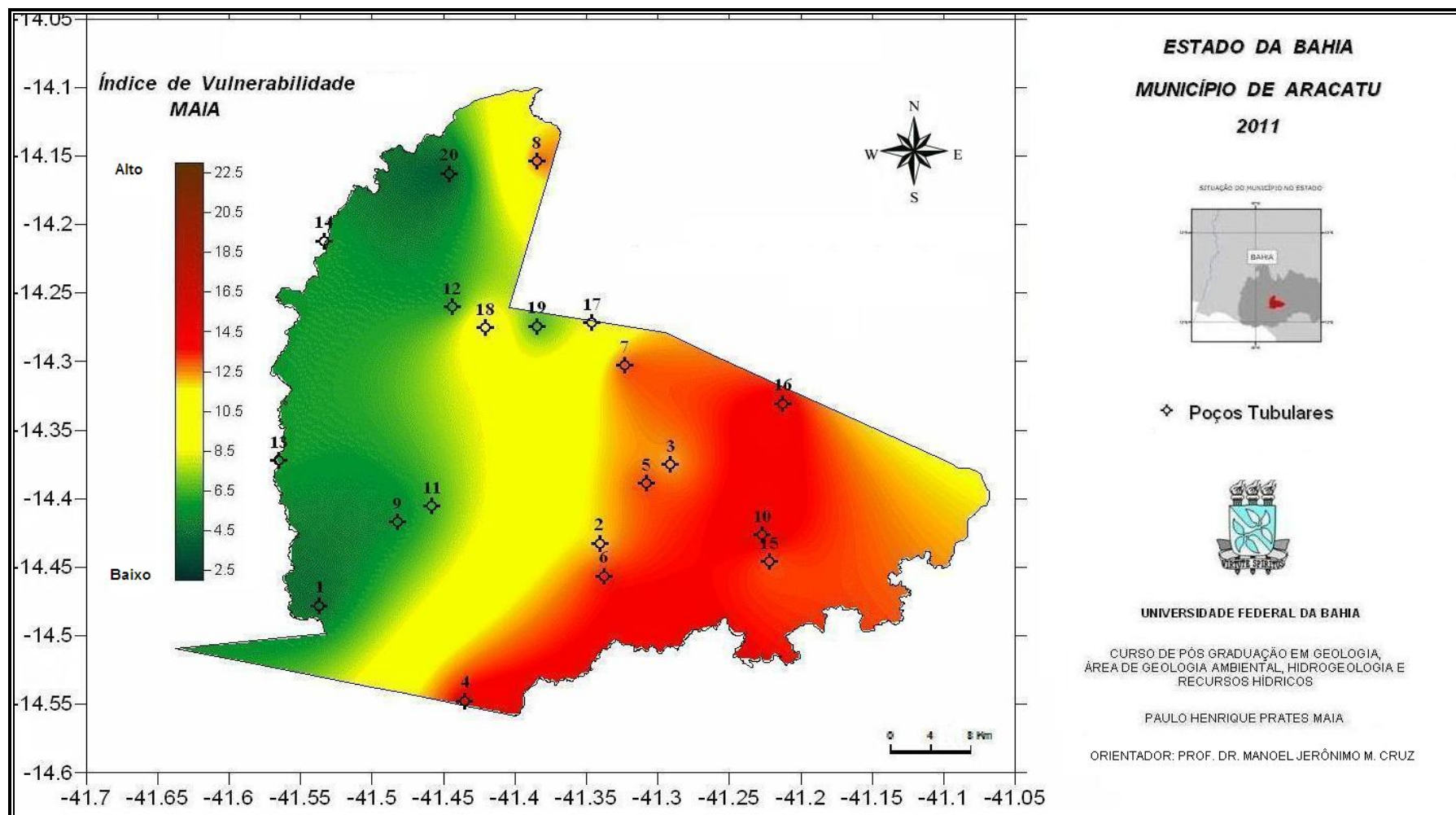


Figura 18 – Mapa do Índice de Vulnerabilidade MAIA no Município de Aracatu

Fonte: Maia (2011)

Observa-se na correlação do índice MAIA, por meio de mapas, com a distribuição de nitratos no município de Aracatu a evidência de uma concentração de valores mais elevados na porção central, com direção NE-SW, e no setor Leste do município, coincidentes com áreas onde os índices de vulnerabilidade variam de Médio a Alto. E índices de vulnerabilidade mais baixos a Oeste coincidentes com áreas com ausência do contaminante (Figura 19).

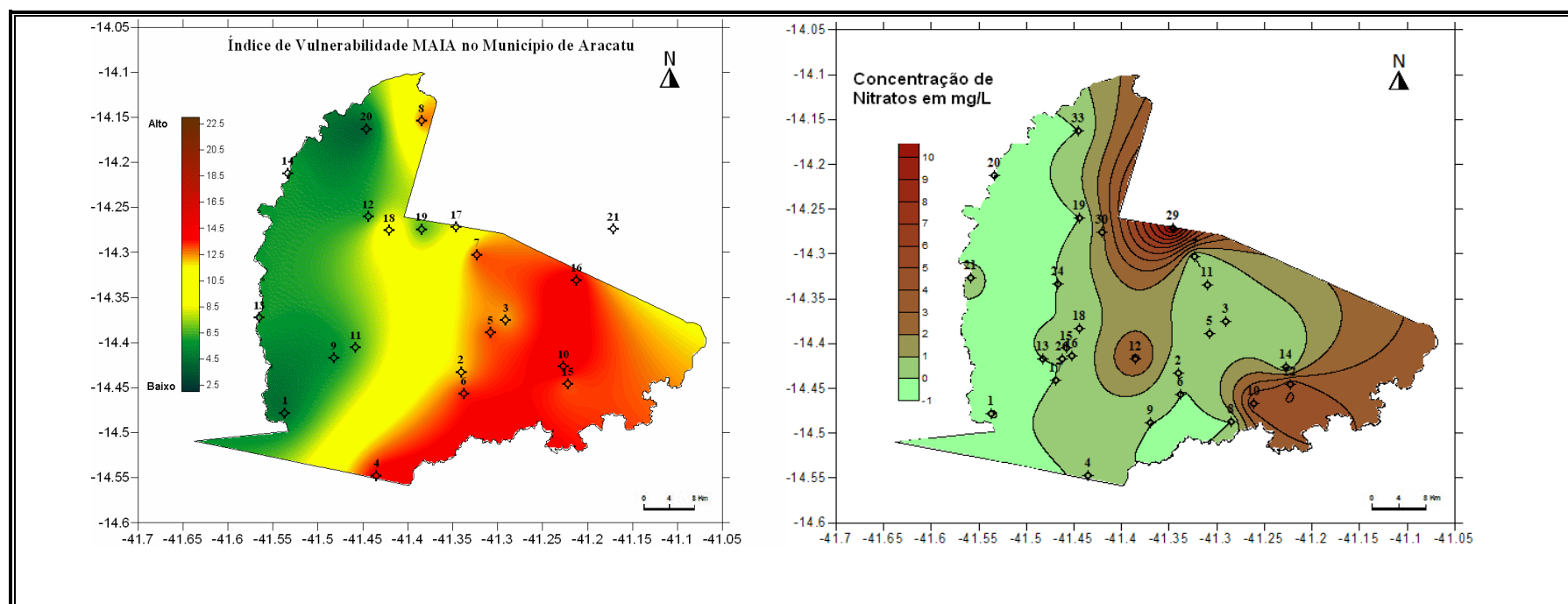


Figura 19 – Correlação do Índice de Vulnerabilidade MAIA com a Concentração de Nitratos

Fonte: Maia (2011).

7.2 CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE COM O MÉTODO DRASTIC

As variáveis requisitadas pelo método DRASTIC também foram coletadas para determinar os índices de vulnerabilidade (Tabela 32).

Tabela 32 - Cálculo do Índice DRASTIC no Município de Aracatu

Poço	Localidade	X	Y	D	Dw	R	Rw	A	Aw	S	Sw	T	Tw	I	Iw	C	Cw	Índice	Qualificação
1	Meleiro	-14,47806	-41,53694	10	5	1	4	3	3	9	2	10	1	4	5	1	3	114,00	Muito baixa
2	Faz.Fundão	-14,43250	-41,34056	9	5	1	4	3	3	9	2	1	1	4	5	1	3	100,00	Insignificante
3	Baixa Escura	-14,37500	-41,29111	9	5	1	4	3	3	9	2	9	1	4	5	1	3	108,00	Muito baixa
4	Pimenta	-14,54750	-41,43500	5	5	1	4	3	3	9	2	10	1	4	5	1	3	89,00	Insignificante
5	Faz. Pau Ferro	-14,38889	-41,30806	9	5	3	4	3	3	9	2	5	1	4	5	1	3	112,00	Muito baixa
6	Faz. Manoel Velho	-14,45639	-41,33806	9	5	3	4	3	3	7	2	9	1	4	5	1	3	112,00	Muito baixa
7	Faz. Duas Irmãs	-14,30250	-41,32361	9	5	1	4	3	3	9	2	9	1	4	5	1	3	108,00	Muito baixa
8	Algodão	-14,41667	-41,38500	5	5	1	4	3	3	10	2	10	1	4	5	2	3	94,00	Insignificante
9	Sede III	-14,41667	-41,48250	10	5	1	4	3	3	10	2	9	1	4	5	1	3	115,00	Muito baixa
10	Pé de Serra	-14,42611	-41,22694	1	5	3	4	3	3	9	2	9	1	4	5	1	3	76,00	Insignificante
11	Sede V	-14,40528	-41,45833	10	5	1	4	3	3	9	2	9	1	4	5	1	3	113,00	Muito baixa
12	Eixo Serra II - Lg Represa	-14,26000	-41,44417	9	5	1	4	3	3	9	2	10	1	4	5	1	3	109,00	Muito baixa
13	Passagem do Lagedo II	-14,37194	-41,56528	9	5	1	4	3	3	9	2	10	1	4	5	1	3	109,00	Muito baixa
14	Patos	-14,21194	-41,53389	7	5	1	4	3	3	9	2	9	1	4	5	1	3	98,00	Insignificante
15	Zacarias	-14,44583	-41,22222	10	5	3	4	3	3	7	2	9	1	4	5	1	3	117,00	Muito baixa
16	Lagoa de Santana	-14,33056	-41,21250	9	5	3	4	3	3	9	2	9	1	4	5	1	3	116,00	Muito baixa
17	Várzea da Pedra	-14,27139	-41,34611	10	5	1	4	3	3	9	2	5	1	4	5	1	3	109,00	Muito baixa
18	Serra Negra	-14,27528	-41,42111	9	5	1	4	3	3	9	2	10	1	4	5	2	3	112,00	Muito baixa
19	Caetano	-14,27417	-41,38500	10	5	1	4	3	3	9	2	3	1	4	5	1	3	107,00	Muito baixa
20	Paris do Matias	-14,16278	-41,44583	9	5	1	4	3	3	7	2	10	1	4	5	1	3	105,00	Insignificante
21	Várzea da Pedra VI	-14,27361	-41,17139	10	5	1	4	3	3	9	2	10	1	4	5	1	3	114,00	Muito baixa
22	Várzea da Pedra III	-14,27389	-41,17111	5	5	1	4	3	3	9	2	5	1	4	5	1	3	84,00	Insignificante

Fonte: Maia (2011)

Os valores dos índices calculados foram espacializados, utilizando o software Surfer 8.0 gerando o mapa de vulnerabilidade (Figura 20).

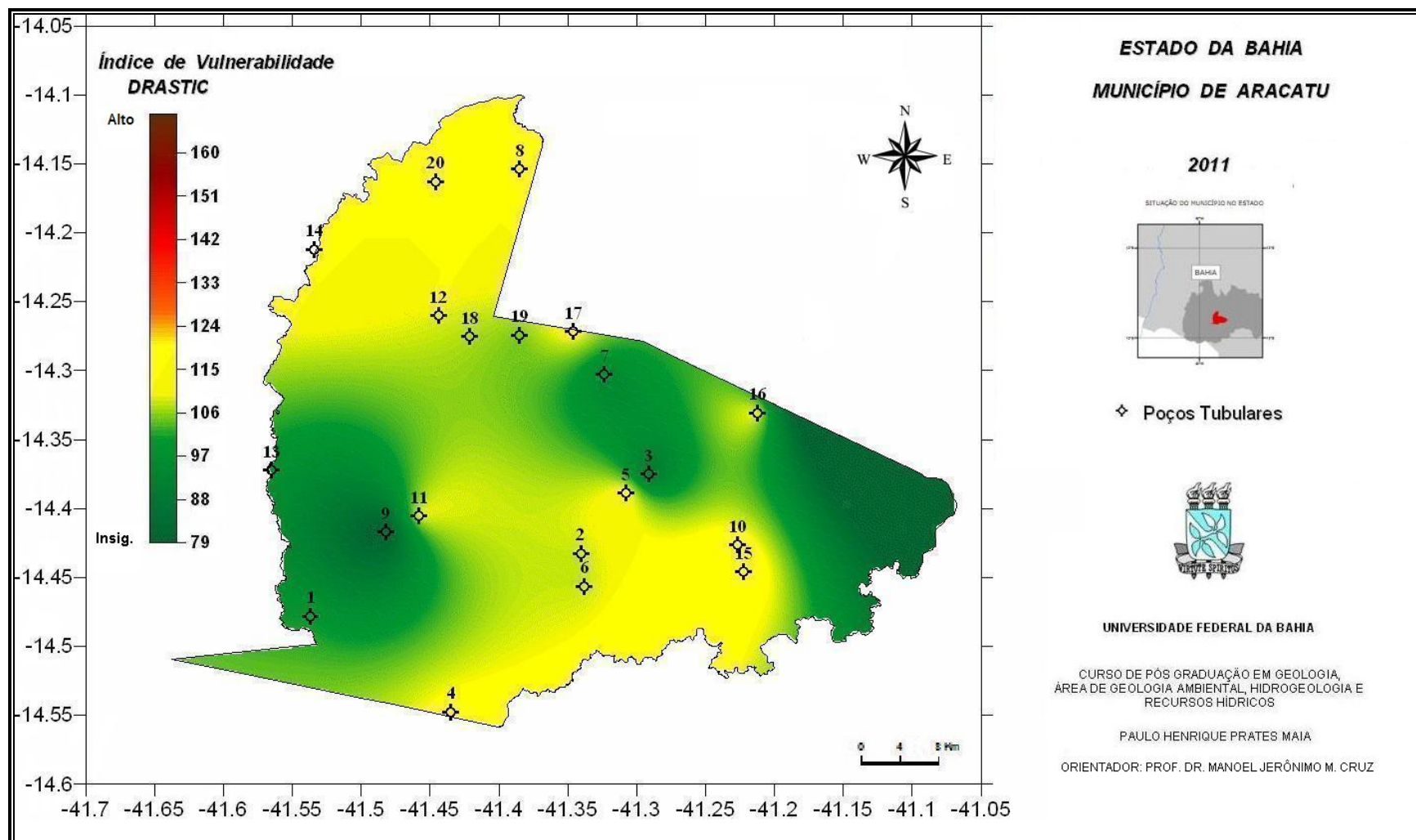


Figura 20 – Mapa do Índice de Vulnerabilidade DRASTIC no Município de Aracatu
Fonte: Maia (2011)

Uma faixa de vulnerabilidade Insignificante com índices variando de 76 a 105 a Oeste sem ocorrência de nitratos e, a Leste e a Nordeste com concentrações de nitrato elevadas; e outra Muito Baixa, variando de 107 a 117, localizada a Norte e a Sudeste, com concentrações de nitrato tanto baixas como altas (Figura 21).

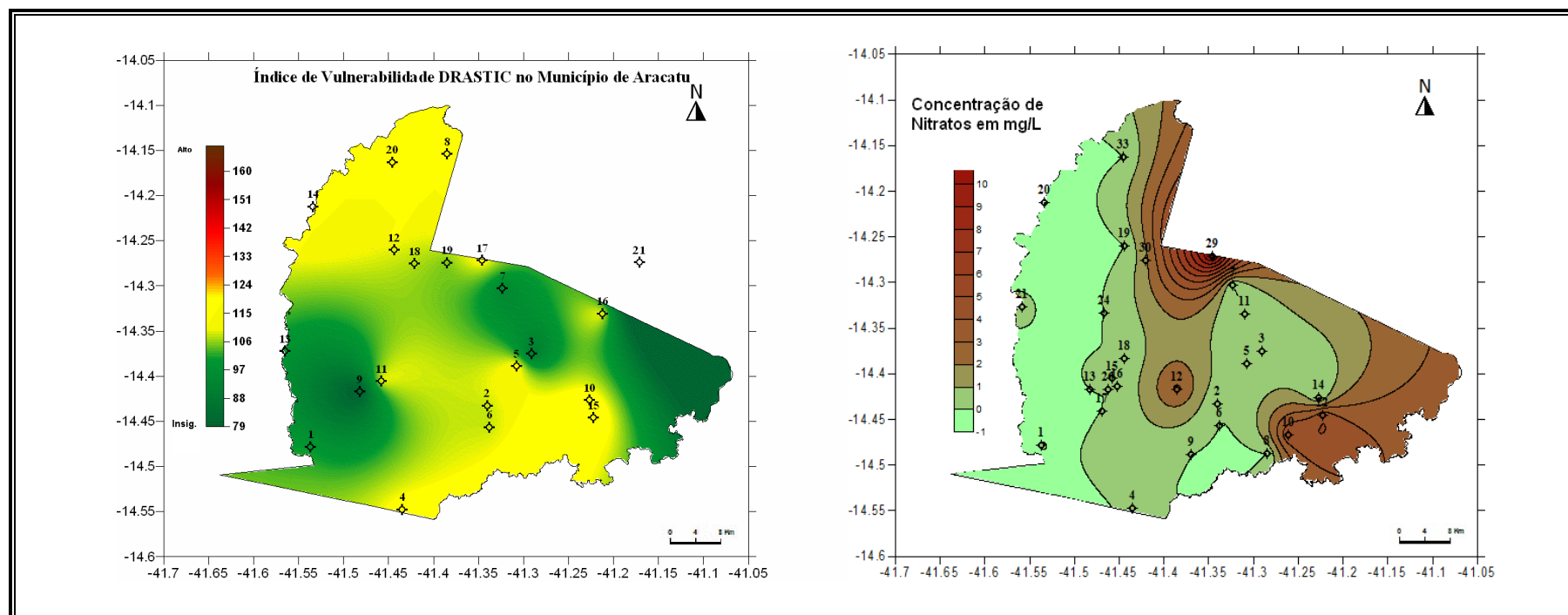


Figura 21 - Correlação do Índice de Vulnerabilidade DRASTIC com a Concentração de Nitratos
Fonte: Maia (2011)

A correlação do índice DRASTIC com a concentração de nitratos por meio de mapas revela que os índices obtidos não estão coerentes com os locais onde ocorre o contaminante.

7.3 CARTOGRAFIA DA VULNERABILIDADE COM O MÉTODO GOD

Os dados requisitados para aplicação do Método GOD foram aplicados na equação, produzindo os índices, (Tabela 33).

Tabela 33 - Cálculo do Índice GOD no município de Aracatu

Poço Nº	Nº de ordem	Localidade	X	Y	G	O	D	Índice	Qualificação
3.044/85	1	Meleiro	-14,47806	-41,53694	0,6	0,4	0,9	0,216	Baixa
3.220/85	2	Faz.Fundão	-14,43250	-41,34056	0,6	0,4	0,9	0,216	Baixa
2.352/84	3	Baixa Escura	-14,37500	-41,29111	0,6	0,6	0,9	0,324	Média
4.469/88	4	Pimenta	-14,54750	-41,43500	0,6	0,4	0,8	0,192	Baixa
4162/87	5	Faz. Pau Ferro	-14,38889	-41,30806	0,6	0,4	0,9	0,216	Baixa
4157/87	6	Faz. Manoel Velho	-14,45639	-41,33806	0,6	0,4	0,9	0,216	Baixa
4147/87	7	Faz. Duas Irmãs	-14,30250	-41,32361	0,6	0,4	0,9	0,216	Baixa
3.139/85	8	Algodão	-14,41667	-41,38500	0,6	0,8	0,8	0,384	Média
2.830/85	9	Sede III	-14,41667	-41,48250	0,6	0,7	0,9	0,378	Média
2.358/84	10	Pé de Serra	-14,42611	-41,22694	0,6	0,4	0,7	0,168	Baixa
4.482/88	11	Sede V	-14,40528	-41,45833	0,6	0,7	0,9	0,378	Média
2-1712	12	Eixo Serra II	-14,26000	-41,44417	0,6	0,7	0,9	0,378	Média
1 5942	13	Passagem do Lagedo II	-14,37194	-41,56528	0,6	0,6	0,9	0,324	Média
2-1707	14	Patos	-14,21194	-41,53389	0,6	0,8	0,8	0,384	Média
1720	15	Zacarias	-14,44583	-41,22222	1	0,4	0,9	0,360	Média
4154/87	16	Lagoa de Santana	-14,33056	-41,21250	0,6	0,7	0,9	0,378	Média
2.355/84	17	Várzea da Pedra	-14,27139	-41,34611	0,6	0,4	0,9	0,216	Baixa
2.243/84	18	Serra Negra	-14,27528	-41,42111	0,6	0,7	0,9	0,378	Média
2-1733	19	Caetano	-14,27417	-41,38500	0,6	0,7	0,9	0,378	Média
2 1728	20	Paris do Matias	-14,16278	-41,44583	0,6	0,4	0,9	0,216	Baixa
1-6491	21	Várzea da Pedra VI	-14,27361	-41,17139	0,6	0,7	0,9	0,378	Média
5.113/92	22	Várzea da Pedra III	-14,27389	-41,17111	0,6	0,4	0,8	0,192	Baixa

Fonte: Maia (2011)

Os valores dos índices calculados foram espacializados, utilizando o software Surfer 8.0 gerando o mapa de vulnerabilidade (Figura 22).

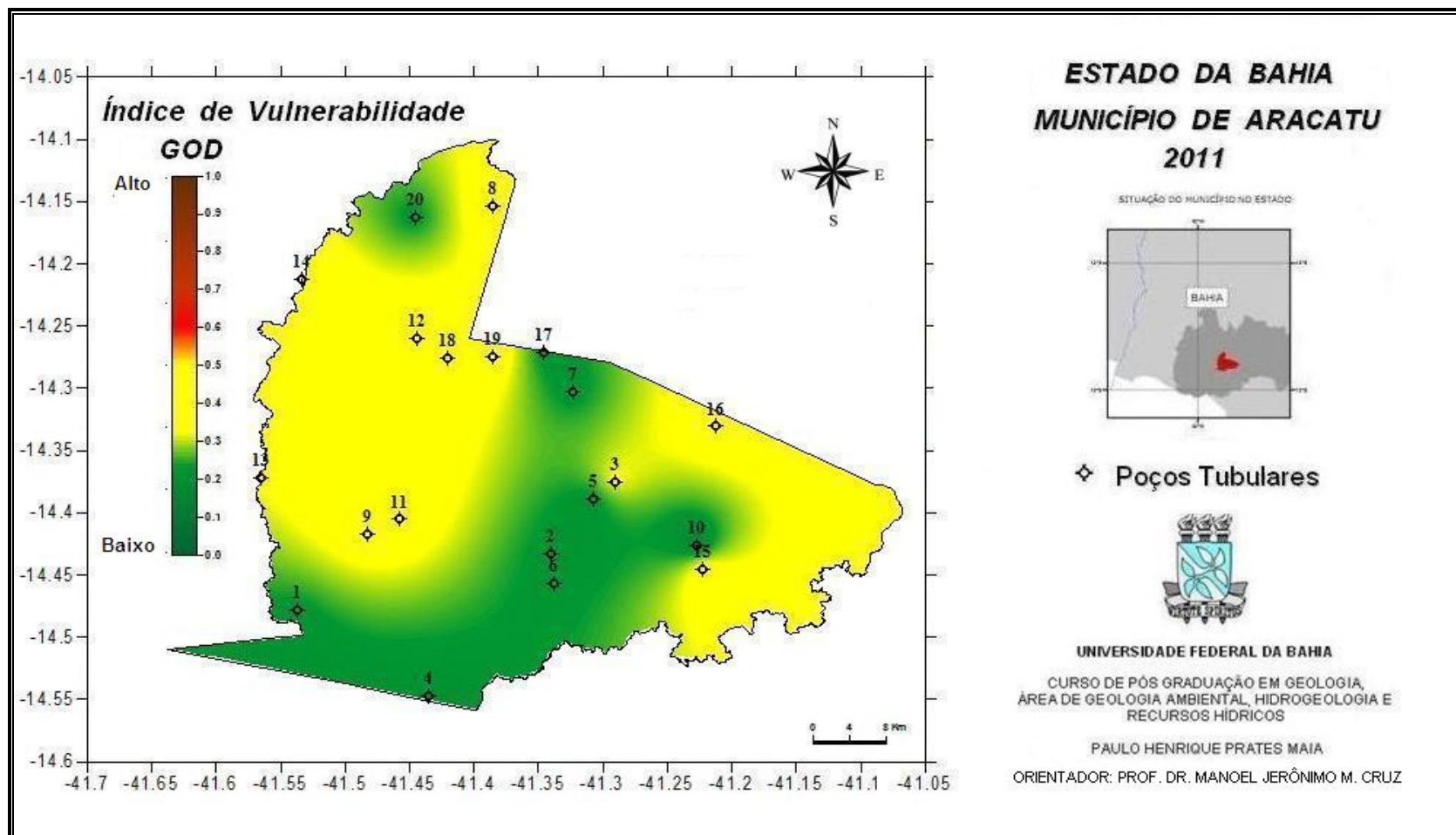


Figura 22 - Mapa do Índice de Vulnerabilidade GOD no Município de Aracatu
Fonte: Maia (2011)

A correlação com a concentração de Nitratos evidencia setores com vulnerabilidade Média coincidentes com áreas contaminadas a Norte e a Leste do município e áreas sem contaminação a Oeste e, locais com Baixa vulnerabilidade como o setor central de direção SW-NE, coincidente com uma faixa com teores elevados de Nitratos A correlação também não se mostra coerente (Figura 23).

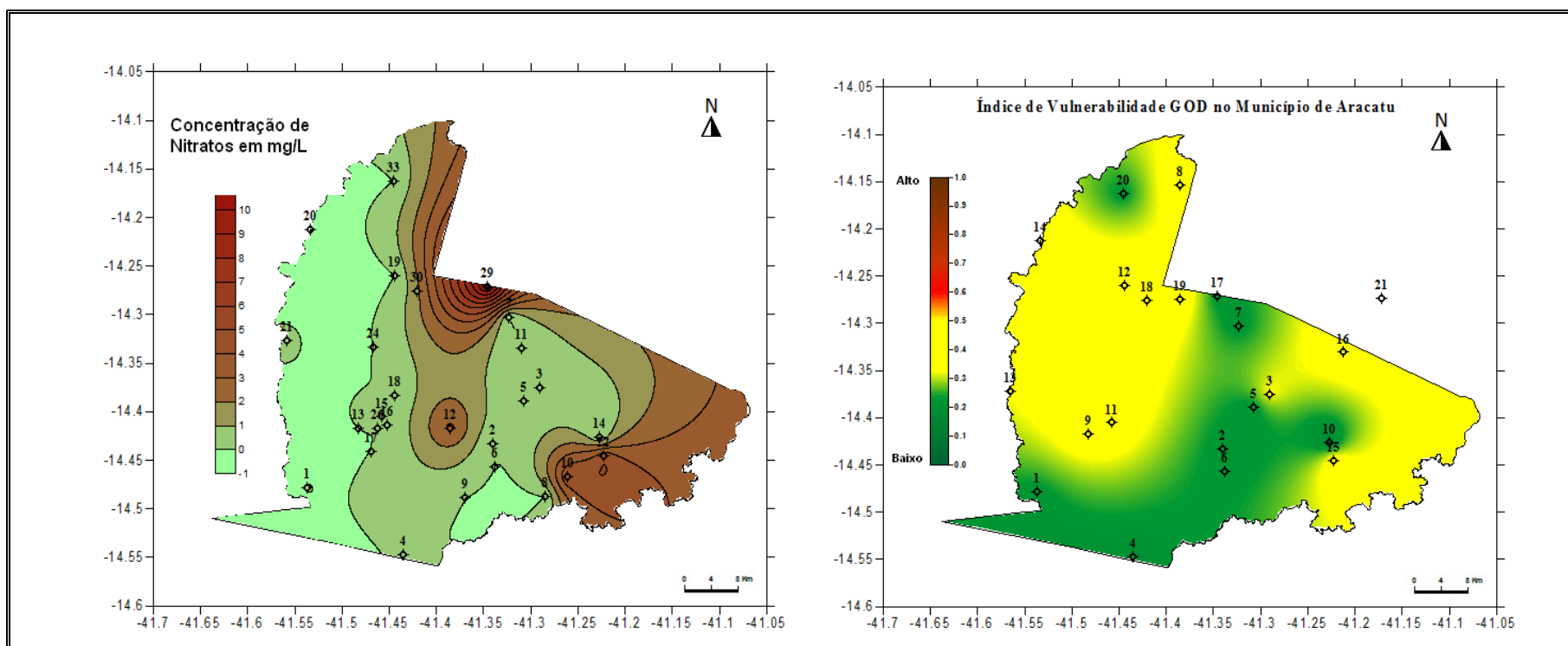


Figura 23 – Correlação do Índice de Vulnerabilidade GOD com a Concentração de Nitratos

Fonte: Maia (2011)

Os coeficientes de correlação entre os índices de vulnerabilidade e as concentrações de Nitrato no município de Aracatu, são muito baixos nos três métodos de acordo com a Tabela 34, permitindo constatar que não existe relação matemática entre eles. Confirmando, portanto, a assertiva de que “Todos os aquíferos são vulneráveis a contaminantes persistentes e móveis” (FOSTER *et al.*, 1988).

Tabela 34 - Correlação dos índices de vulnerabilidade com as concentrações de Nitrato no Município de Aracatu

ÍNDICES	Coeficientes de Correlação com Nitratos
MAIA	0,0029
GOD	0,0015
DRASTIC	0,0244

Fonte: Maia (2011)

7.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Os índices de vulnerabilidade DRASTIC variaram de 76 a 117, em decorrência da repetição dos valores das variáveis vinculadas a rochas e solos que produziram somente duas classes de vulnerabilidade: insignificante e predominantemente muito baixa, caracterizando os aquíferos de Aracatu como bem protegidos. Esse resultado provavelmente é consequência da forma como se determina os valores das variáveis (Tabela 29).

A correlação por meio de mapas dos Índices com Nitratos revela uma faixa de vulnerabilidade Insignificante, com índices variando de 76 a 105, a Oeste sem ocorrência de Nitratos e, a Leste e a Nordeste com concentrações de nitrato elevadas; e outra Muito Baixa, variando de 107 a 117, localizada a Norte e a Sudeste, com concentrações de Nitrato tanto baixas como altas. A correlação do índice DRASTIC com a concentração de nitratos revela que os índices obtidos não estão coerentes com os locais onde ocorrem concentrações ou ausência do contaminante.

O índice de vulnerabilidade GOD variou de 0,168 a 0,384, apresentando índices predominantemente Baixos e Médios. A correlação com a concentração de Nitratos evidencia setores com vulnerabilidade Média coincidentes com áreas contaminadas a Norte e a Leste do município e áreas sem contaminação a Oeste e,

locais com Baixa vulnerabilidade como o setor central de direção SW-NE, coincidente com uma faixa com teores elevados de Nitratos. A correlação do índice GOD com a concentração de nitratos revela que os índices também não estão coerentes com os locais onde ocorrem concentrações ou ausência do contaminante

É difícil explicar que uma região submetida a grandes esforços tectônicos com tantas fraturas abertas e expostas na superfície do terreno, com solos pouco espessos e níveis estáticos relativamente rasos, apresentem índices de vulnerabilidade: DRASTIC variando de Insignificante a Muito Baixo e GOD, predominantemente Baixo a Médio. Ambos os métodos qualificam os aquíferos do município como bem protegidos.

O fato é que esses métodos além de terem sido desenvolvidos para aplicações em aquíferos granulares, a forma de obtenção das variáveis, por meio de tabelas, e o uso de fatores de ponderação aumenta a possibilidade de se obter índices similares por meio de uma combinação de diferentes situações hidrogeológicas, compromete os resultados obtidos no cálculo da vulnerabilidade e pode acarretar em riscos na tomada de decisões.

O mapa com Índice de vulnerabilidade MAIA apresenta valores baixos no setor oeste do município, variando de 4,29 a 6,46, com direção NNE, gradando para valores dos índices de vulnerabilidade médios, variando de 7,66 a 12,19, na mesma direção no setor central, até atingir os índices mais altos, variando de 12,76 a 14,33, no setor Leste.

A correlação do índice MAIA com a distribuição de nitratos, por meio de mapas, no município de Aracatu apresenta uma concentração de valores mais elevados na porção central, com direção NE-SW, e no setor Leste do município, coincidentes com áreas onde os índices de vulnerabilidade variam de médio a alto. E índices de vulnerabilidade mais baixos a Oeste coincidentes com áreas com ausência do contaminante.

Os coeficientes de correlação entre os índices de vulnerabilidade e as concentrações de Nitrato no município de Aracatu, são muito baixos nos três métodos, evidenciando que não existe uma relação matemática entre eles. Atualmente não se conhece um método descrito na literatura cujos índices de

vulnerabilidade apresentem um coeficiente de correlação razoável com as concentrações de Nitrato e, de acordo com Auge (2003), “a solubilidade, mobilidade e persistência de certos contaminantes como os nitratos, fazem com que algumas variáveis percam consistência em relação à vulnerabilidade.”

Os índices de vulnerabilidade calculados estão coerentes com a distribuição da pluviosidade que corresponde a recarga potencial (Figura 24) e com a topografia observada no modelo numérico do terreno, que influencia os valores das variáveis: Profundidade da Água e Declividade do Terreno (Figura 25).

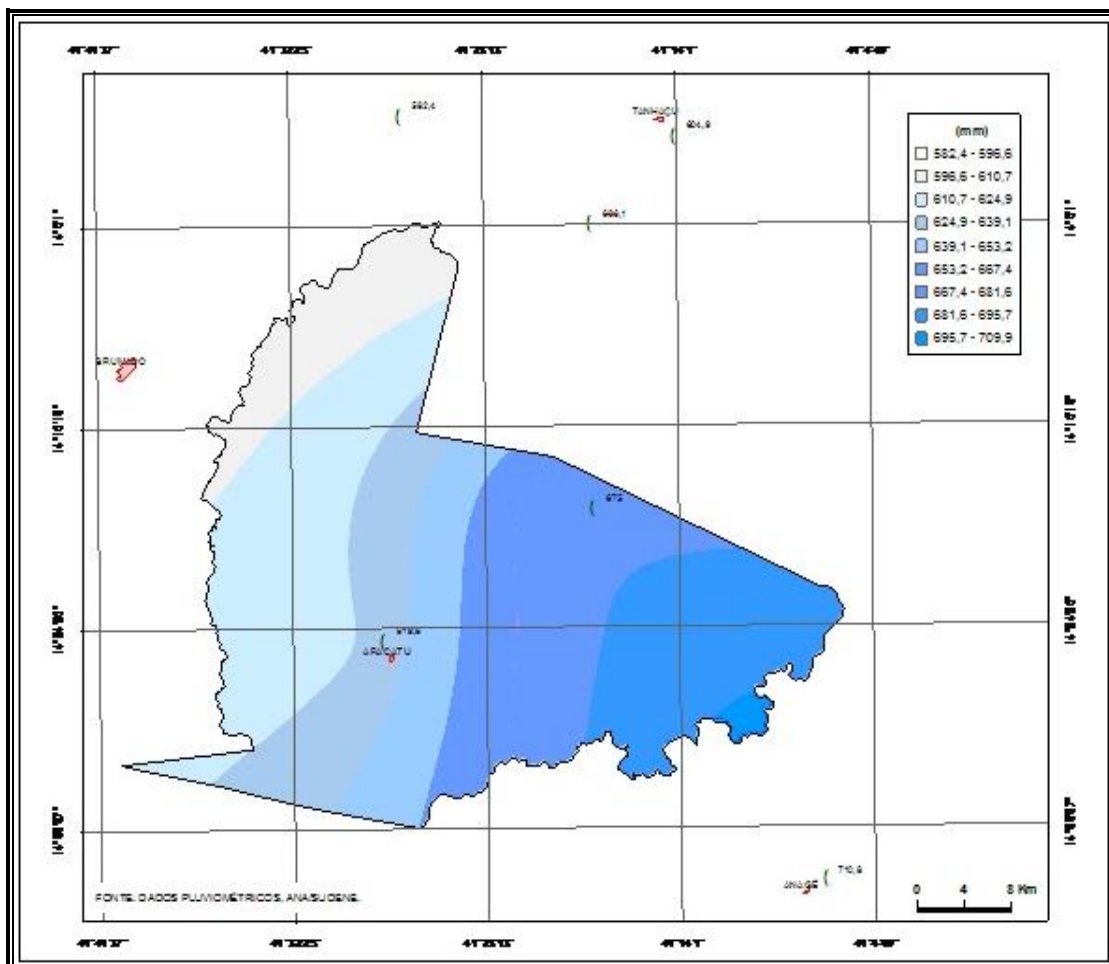


Figura 24 – Distribuição da Pluviosidade Média Anual no Município de Aracatu
Fonte: Maia (2005)

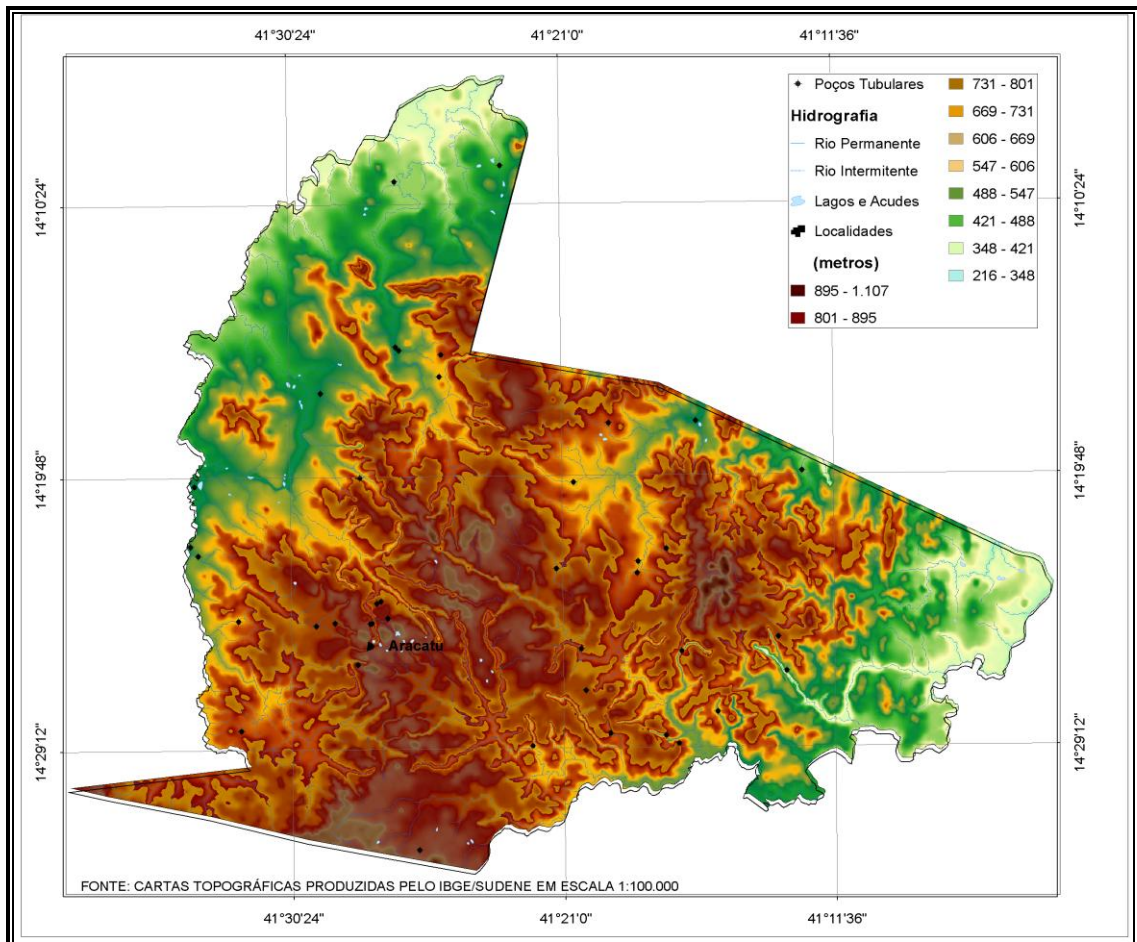


Figura 25 - Modelo Numérico do Terreno do Município de Aracatu

Fonte: Maia (2005)

As variáveis do DRASTIC que dependem da litologia, como: Natureza do Aquífero (A) e Impacto da Zona não Saturada (I) apresentam os mesmos valores em quase todos os poços. A Recarga Líquida (R) e a Permeabilidade (C) também apresentam valores repetidos. Isso faz com que os índices de vulnerabilidade determinados sejam iguais ou muito parecidos. O mesmo ocorre com o GOD que possui duas variáveis de três vinculadas a litologia.

8 CONCLUSÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa e as principais conclusões extraídas da tese.

O novo método apresenta características de um Modelo Análogo e Paramétrico que utiliza uma expressão matemática constituída por uma seleção de parâmetros indicadores de vulnerabilidade cujos valores medidos no sistema aquífero interagem para produzir um índice de vulnerabilidade universal.

A estratégia adotada na pesquisa foi a de utilizar no método somente variáveis mensuráveis que além de imprimir um caráter universal ao método, acentua a sensibilidade do índice para detectar diferenças decorrentes de pequenas variações nos parâmetros que o qualifica para ser aplicado tanto em áreas com o mesmo tipo de aquífero, como em áreas com vários tipos diferentes.

As variáveis selecionadas são características intrínsecas dos aquíferos relacionadas com a vulnerabilidade que apresentam com ela uma relação matemática direta ou inversa. A partir da análise das relações matemáticas que cada parcela imprime na proteção ou na vulnerabilidade dos aquíferos foi deduzida a equação do novo método.

A análise das relações entre os fatores de proteção, representados pelos valores das variáveis, com os índices de vulnerabilidade, permite constatar que os índices obtidos com o método MAIA estão coerentes e nos conduz a percepção de que ele é eficaz na determinação da vulnerabilidade dos aquíferos.

A equação descreve a vulnerabilidade a partir do somatório dos efeitos de proteção das parcelas representadas pelas variáveis: PA, ES e DT, inversamente relacionadas a acessibilidade e atenuação de contaminantes, adicionado aos efeitos na vulnerabilidade produzidos pelas parcelas CE, RE, DF e TA, diretamente relacionadas a acessibilidade de contaminantes ao aquífero.

As variáveis são medidas em unidades de natureza diferentes, por exemplo, a “Profundidade da água” e “Espessura do Solo” (m); “Capacidade Específica” ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$), também apresentam intervalos de valores com diferentes amplitudes, por exemplo, os valores da “Capacidade Específica” de um determinado aquífero variam de 0,0071 e 46,31 ($\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$) enquanto que os valores da “Profundidade da Água” variam no Intervalo de 1,00 a mais de 128,7 (m).

Para solucionar este problema no novo método, os valores das variáveis foram colocados em uma escala equivalente para evitar o uso de fatores de ponderação subjetivos como aqueles usados nos métodos tradicionais. As escalas são proporcionais e, todas as equivalentes são de mesma amplitude. A solução consistiu em reduzir a índices os valores medidos, considerando o menor um e o maior dez e, os demais valores são obtidos por meio de interpolação. Também poderia ser o menor um e o maior cem.

Em ambientes aquíferos fissurais e cársticos com dados de Densidade de Fratura (DF), se utiliza a equação I:

$$V = \left[\left(\frac{1}{PA} + \frac{1}{ES} + \frac{1}{DT} \right) + CE + RE + DF \right] \quad (\text{Equação I})$$

Em ambientes aquíferos granulares que dispõe de dados de qualidade de Transmissividade do Aquífero (TA) deve ser aplicada equação II:

$$V = \left[\left(\frac{1}{PA} + \frac{1}{ES} + \frac{1}{DT} \right) + CE + RE + TA \right] \quad (\text{Equação II})$$

A equação do método MAIA contempla cinco ou seis variáveis relacionadas à vulnerabilidade ou a proteção dos aquíferos. Consideramos um número razoável de parâmetros, nem sete como no DRASTIC e no SINTACS, tampouco três como no GOD ou mesmo duas como no EKv.

Considerando a versatilidade do método, outras variáveis podem ser aplicadas em sua equação, desde que esta tenha uma relação matemática com a vulnerabilidade, porém a estratégia adotada na pesquisa foi a de usar somente parâmetros mensuráveis.

A condutividade hidráulica não foi utilizada porque a correlação entre os valores do Coeficiente Hidráulico e da Transmissividade revelou um coeficiente de correlação elevado (0,868), sinalizando para uma superposição do efeito de proteção das duas variáveis, o que faz com que uma ou de outra possa ser aplicada na equação. Neste caso, quando se dispuser de dados confiáveis deve-se optar pelo uso da Transmissividade.

A correlação entre os fatores de proteção das variáveis e a vulnerabilidade, permitiu avaliar o impacto que cada uma delas imprime ao cálculo e constatar que os dados requisitados pela equação estão coerentes com os índices obtidos na modelagem. A correlação das variáveis utilizadas com o índice MAIA, conduz a percepção de que o novo método é eficaz na determinação da vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos.

É notável a sensibilidade do novo método na cartografia dos índices de vulnerabilidade no município de Aracatu, onde foram determinadas três classes de vulnerabilidade com expressiva frequência de valores elevados.

A correlação do índice MAIA com a distribuição de nitratos no município de Aracatu revelou a existência de valores mais elevados na porção central, com direção Norte-Sul, e no setor Leste do município, coincidentes com os locais onde os índices de vulnerabilidade variam de médio a alto (Figura 19). Apesar de esse resultado corroborar para a validação do método, ele deve ser visto com ressalvas, pois um aquífero pode configurar uma situação de alta vulnerabilidade, porém sem risco de poluição devido a ausência de carga poluidora ou ao contrário, configurar uma situação de baixa vulnerabilidade com risco elevado pela presença de uma carga poluidora significativa.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, B.; FOSTER, S. Land-surface zoning for groundwater protection. **Journal of the Institution of Water and Environmental Management**, London, n. 6, p. 312-320, 1992.
- ALBINET, M ; MARGAT, J. Cartographie de la vulnerabilite a la pollution des nappes d'eau soterraine. **Bull BRGM 2me Series**, v. 3, n. 4, p. 13-22, 1970.
- ALLER, L.; BENNET, T; LEHER, J.; PETTY, R. **Drastic**: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. USA, 1985.
- AGÜERO VALVERDE, J. **Análisis de vulnerabilidad a la contaminación de una sección de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica**. [S. l.:s. N.], 2000. Proyecto de Graduación.
- AGÜERO VALVERDE, J.; MESALLES, R. P. **Analisis de vulnerabilidad a la contaminacion de una seccion de los acuíferos del Valle Central de Costa Rica**. 2002. Disponível em <http://gis.esri.com/library/userconf/latinproc00/costa_rica/analisis_vulnerabilidad/vulnerabilidad.html>. Acesso em: 06 jun. 2008.
- AUGE, M. **Primer Curso de Posgrado de Hidrogeología Ambiental**. UBA: 1-65. Buenos Aires. 1995.
- _____. Vulnerabilidade de aquíferos. **Revista Latino-Americana de Hidrogeologia**, Curitiba, n. 4, p. 85-103, 2004.
- AUGE, M. **Vulnerabilidad de acuíferos**: conceptos y metodos. Buenos Aires: Universidade de Buenos Aires, 2003. Disponível em: <<http://www.tierra.rediris.es/hidrored/ebvulnerabilidad.html>>. Acesso em: 4 jun.2008.
- BACHMAT, Y.; COLLIN, M. Mapping to assess groundwater vulnerability to pollution. In: _____. **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants**. The Hague: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 297-307.
- BANCO MUNDIAL/ BANCO INTERNACIONAL DE RECONSTRUÇÃO E DESENVOLVIMENTO. **Proteção da qualidade da água subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais, 2006.
- CARBONELL, A. **Groundwater vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty**. Washington: National Research Council, 1993.

CARTER, A.; PALMER, R.; MONKHOUSE, R. Mapping the vulnerability of groundwater to pollution from agriculture practice particularly in respect of nitrate. In: _____ . **Inter. Conf. Vulnerability of soil and Groundwater to Pollutant. Nordwijk, Pro. Nordwijk**, Países Baixos. IHAS, 1987.

CANTER, L; KNOX, R.; FAIRCHILD, D. **Groundwater quality protection**. Lewis Publishers, Inc., 562 p, 1987.

CIVITA, M.; CHIAPPONE A.; FALCO M.; JARRE P. Preparazione della carta di vulnerabilità per la riocalizzazione di un impianto pozzi dell' Aquedotto di Torino. In: _____ . **Conv. Naz., 1., 1990, Marano sul Parnaro. Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: metodologie, tecnologie e obiettivi. Proceeding**. Marano Sul Parnaro: [s.n.], 1990. p. 461- 462.

CUSTÓDIO, E. Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. In: _____ . **Seminário Hispano – Argentino sobre temas actuales de hidrologia subterrânea**, 2., 1995, San Miguel de Tucumán. Anais... San Miguel de Tucumán: [s. n.], 1995. p. 99-122.

DOERFLIGER, N. e ZWAHLEN, F. EPIK - a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: _____ . **Int. Symp. on karst waters and environ**. Impacts. 1997, Antalya, Turkey. Proceedings... Rotterdam: [s.n.], 1997. p. 117-123.

DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P. Y.; ZWAHLEN, F. Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: a new method of desining protection areas using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environmental Geology**, v. 39, n. 2, 1999.

EPPNA - Informação Cartográfica dos Planos de Bacia. Sistematização das Figuras e Cartas a Imprimir em Papel. Equipe de Projeto do Plano Nacional da Água, versão de Outubro de 1998, 29 pp., Lisboa.

FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: _____ . **Vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas: fundamentos e conceitos para uma melhor gestão e protecção dos aquíferos de Portugal**. IV Congresso da Água. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos. Lisboa, 1987.

FOSTER, S; HIRATA, R. **Determinación del riesgo da contaminación de águas subterrâneas**: uma metodologia baseada em dados existentes. Lima: CEPIS, 1991.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R.; GOMES D.; D' ELIA M.; PARIS M. **Groundwater quality protection**: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies, 2002. The International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. Edição brasileira: Servmar – Serviços Técnicos Ambientais Ltda. São Paulo Brasil, 2006.

FOSTER, S. S. D. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: _____. **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants.** The Hague TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69-86.

FOSTER, S. S. D.; VENTURA, M.; HIRATA, R. C. **Contaminação de las águas subterrâneas.** Lima, Peru: Organização Mundial de la Salud, 1987.<<http://www.ga.gov.au/urban/projects/cities.jsp>>. Acesso em: 29 jun. 2008.

FRANCÉS, A.; PARALTA, E.; FERNANDES, J. **Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agriculture pollution:** the susceptibility index. 3rd International Conference on Future Grandwater Resourses at Risk, Unesco/IAH, Lisbon, 2001, 9p.

HAERTLÉ, T. Method of working and employment of EDP during the preparation of groundwater vulnerability maps. In: _____. **Groundwater in water resources planning,** UNESCO. INTER. SYMP, Proc...Koblenz, Alemaña, 1983, UNESCO/IAH/IAHS. vol II, 1073-1085 p.

HIRATA, R. C. A. & REBOUÇAS A. **La protección de los recursos hídricos subterráneos:** una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. Noviembre 2001. Disponível em: <<http://www.medioambienteonline.com>> Acesso em: 15 set. 2009.

HIRATA, R. C. A.- Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a Vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: _____. **Seminário Taller, 1.,** 2001, SãoPaulo.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Determinação de riscos de contaminação das águas subterrâneas:** um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. (Boletim n.10). 87 p.

FOSTER, S.; HIRATA, R. **Groundwater pollution risk evaluation:** the methodology using available data. CEPIS Tech. Report. (WHO-PAHO-CEPIS), Lima, Perú 1988.

FOSTER, S.; HIRATA, R. C.; ROCHA, G. A. Riscos de poluição das águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional. In: _____. **Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 5º,** São Paulo, SP, 1988 - Anais - p.175 - 185.

HOLDEN, L. R., J. A. GRAHAM, R. W. WHITMORE, W. J. ALEXANDER, R.W. PRATT, S. K. LIDDLE, e L. L. PIPER. Results of the national alachlor waterwell survey." **Environmental Science and Technology,** 1992, 26: 935–943.

JAKOB, A. A. E. **A krigagem como método de análise de dados demográficos,** UNICAMPO/NEPO, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil, novembro de 2002.

_____. **Kriging demographic variables in order to look for trends in the spatial distribution of population.** Trabalho Final do Curso *Spatial Modeling and Analysis* – CSS 620, do Department of Crop and Soil Sciences, Cornell University, Ithaca, NY, 2002.

KALINSKI, R. J., W. E. KELLY, I. BOGARDI, R. L. EHRMAN, e P. D. YAMAMOTO-. Correlation between DRASTIC vulnerabilities and incidents of VOC contamination of municipal wells in Nebraska. **Ground Water**, 32(1): 31–34, 1994.

KOOGAN, A. **Enciclopédia e dicionário ilustrado.** Rio de Janeiro: Delta, 1994.

LEITE, C. E. S.; MOBUS, G. Vulnerabilidade natural à contaminação dos Aquíferos da região de rochas sedimentares da bacia do rio Mundaú/Ceará. In: _____. **Congresso Brasileiro de Água Subterrânea**, 10, 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: ABAS, 1998.

LE GRAND, H. **A standardized system for evaluating waste disposal sites.** NWWA, Worthington, 1983.

_____. System for evaluating contamination potential for some waste sites. **American Water Work Association Journal**, v. 56, n. 8, p. 959-974, 1964.

LOBO-FERREIRA, J.P. e CALADO, F. **Avaliação da vulnerabilidade à poluição e qualidade das águas subterrâneas de Portugal.** Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1989.

LOBO-FERREIRA, J.P.; CABRAL, M. Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources. In: _____. **Meeting of the European Institute for Water**, 1991, Brussels. Proceedings... Brussels: Groundwater Work Group, 1991.

LOBO-FERREIRA, J.P. **Inventariando, monitorizando e gerindo de forma sustentável:** recursos hídricos subterrâneos. LNEC, 1990.

MAIA P. H. P. **Meio ambiente e potencialidades hídricas na região de Aracatu:** Sudoeste da Bahia. Dissertação de Mestrado, Salvador-Bahia, 2005.

MAIA, P.H.P., CRUZ, M.J.M. Um novo método para avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology** - BJUST, v. 15, n. 2, p. 29-40, 2011.

MAIA, P.H.P., CRUZ, M.J.M. & SAMPAIO, M.C. Zoneamento dos aquíferos do Estado da Bahia, **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology** - BJUST, v. 13, n. 1, p. 45-52, 2009.

MARCOLONGO B. e L. PRETTO. **Vulnerabilità degli acquiferi nella pianura a nord di Vincenza.** Publ. GNDCI-CNR. 28: 1-13. 1987.

MARGAT, J. **Vulnérabilité des nappes d'eau souterraines à la pollution: basses de la cartographie.** Orléans: BRGM, 1968.

MONKHOUSE, R. A. **Vulnerability of aquifers and groundwater quality in the United Kingdom.** Institute of Geological Sciences Report. Nottingham, Reino Unido, 1983.

NASCIMENTO, S. A. de M. **Diagnóstico Hidrogeológico, Hidroquímico e da Qualidade da Água do Aquífero Freático do Alto Cristalino de Salvador – Bahia.** Tese de Doutorado, Salvador- Bahia, abril de 2008.

NRC (National Research Council). **Groundwater vulnerability assessment: contamination potential under conditions of uncertainty.** Washington, D.C.: National Academy Press, 1991.

PARALTA, E. A.; FRANCÉS, A. P. Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição do complexo gabro-diorítico de Serpa-Brnches. Geonovas, **Revista de Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos**, Porto, v. 14, p. 82-83, 2000.

PARALTA, E.; OLIVEIRA, M.M.; FRANCÉS, A.; RIBEIRO, L.F. e CEREJEIRA, M.J. **Aplicação de SIG na Avaliação da Vulnerabilidade Aquífera e Cartografia da Contaminação Agrícola por Pesticidas e Nitratos na região do Ribatejo.** Publicações do Seminário “A Hidroinformática em Portugal”, LNEC, Lisboa, 2001, 16p.

PARALTA, E. A.; FRANCÉS, A. P.; SARMENTO, P. A. **Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição agrícola do aquífero mio-pliocénico da região de Canhestros (Alentejo).** 6º Congresso da Água, Lisboa, 2003.

PARALTA, E., FRANCES, A.; RIBEIRO, L. **Avaliação da Vulnerabilidade do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja e Análise Crítica das redes de monitorização no Contexto da Directiva Quadro da Água.** Publicações do 7º Simpósio de Hidráulica e recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa (SISLUBA). Évora, 30 de Maio a 2 de Junho de 2005.

PARASCANDOLA, M. F. **Carte de classification des terrains en fonction de leur vulnérabilité vallée du Rhône entre Valence et Orange, du Viverai, du Vercors, du Dévoluy et des Baronnies.** Travaux de thèse Univ.Science et Technique de Montpellier.Edition BRGM, 1979.

PRIBERAM - Dicionário On Line. Disponível em: <<http://www.priberam.pt/dlpo/dlpo.aspx>> Acesso em: 06/11/2008.

Protección de Acuíferos frente a la contaminación: metodología. Toluca, México, 2001. Disponível em: <<http://tierra.rediris.es/hidrored/RVA.html>>. Acesso em: 4 jun. 2008.

RODRIGUES, Z. R. C. **Planilhas para Cálculos de Teste de Bombeamento em Poços Tubulares**, Salvador, 2004.

RODRIGUEZ, R.; RAMOS, G. Inventario de sítios contaminados en la Zona Metropolitana de la Cuenca de México: critérios de selección de áreas piloto. In: _____ . **Seminário Internacional sobre Restauracion de Sítios Contaminados**, 1997, México. Anais...Mexico: Cênica, p.101-106, 1977.

ROSEN, L. A study of the DRASTIC methodology with emphasis on Swedish conditions. **Ground Water**, 32(2): 278–285; 1994.

SELLER, L.; CANTER, L. Summary of selected groundwater quality impact assessment methods. **NCGWR Report.**, p. 80-3, Norman OK, 1980.

SÉGUIER, J. **Dicionário prático ilustrado**: novo dicionário encyclopédico luso-brasileiro. Porto: Lello e Irmão, 1935.

TRIPET J. P. DOERFLIGER N. e F. ZWAHLEN. Vulnerability mapping in karst areas and its uses in Switzerland. **Hydrogéologie**. 3: 15-57. 1997.

VAN STEMPVOORT, EWERT, L. ; WASSENAAR, L. Aquifer Vulnerability Index: GIS Compatible Method for Groundwater Vulnerability Mapping, **Canadian Water Resources**, vol.18, nº1.; 1992.

VRBA, J.; ZAPOROZEC, A. **Guidebook on mapping groundwater vulnerability.** Hannover: International Association of Hydrogeologists, 1994.

WILKINSON, B. H.; MCELROY, B. J. Impact of humans on continental erosion and sedimentation, **GSA Bulletin**; January/February, v. 119; no. 1/2; p. 140–156, 2007.

APÊNDICES