

MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS

Nilson Guiguer¹ & Michael Wolfgang Kohnke¹

Resumo - Em várias partes do mundo tem se observado um forte crescimento da população. Isto tem gerado uma crescente demanda por água potável e, paralelamente, um aumento do risco de contaminação de corpos d'água superficiais e de subsuperfície. Para fazer frente a esta situação as autoridades municipais e estaduais devem desenvolver planos estratégicos de gestão e conservação dos recursos hídricos. As águas subterrâneas são uma parte importante destes planos, principalmente em áreas onde as águas superficiais encontram-se deterioradas ou são escassas. Nestas áreas é recomendável que sejam executados estudos de vulnerabilidade de aquíferos para complementar o plano de gestão de águas. Existem diversas metodologias para se determinar a vulnerabilidade de aquíferos, sendo DRASTIC, AVI e GOD as mais utilizadas atualmente. Todas deveriam ser aplicadas através da utilização de sistemas de informações geográficas (SIG), já que ocorre sempre uma sobreposição de mapas de parâmetros. Os resultados de um estudo de vulnerabilidade de aquíferos permitem às autoridades municipais e estaduais gerir seus recursos hídricos de maneira mais eficiente, garantindo um desenvolvimento sustentável.

Abstract - Many regions in the world are undergoing significant growth. Due to this growth both drinking water demands as well as the contamination potential are increasing. As a result, many municipalities are developing water management strategies. Groundwater is an important part of this strategy, specially in areas where surface water is deteriorating or is scarce. Aquifer vulnerability assessment should be considered an important component of a water management plan. There are many different methodologies to assess groundwater vulnerability, among them the most used are DRASTIC, AVI and GOD. All methodologies use different data sources, which are interpreted together. The best way to execute these interpretations is through the usage of GIS (Geographical Information Systems). Vulnerability studies allow municipalities to proactively protect its groundwater resources ensuring its sustainable exploitation.

Palavras-chave – vulnerabilidade, modelos matemáticos

¹ Waterloo Hydrogeologic, Inc. 101-460 Phillip Street – Waterloo, ON – Canada N2T 2L5 tel. (519) 746 1798 fax (519) 885 5262 www.waterloohydrogeologic.com; nguiguer@flowpath.com; mkohnke@flowpath.com

1. INTRODUÇÃO

A vulnerabilidade de um sistema aquífero depende das suas propriedades físicas bem como de sua sensibilidade a impactos naturais e àqueles causados por seres humanos. A idéia da vulnerabilidade baseia-se no fato de que o contexto físico dos aquíferos oferece um certo grau de proteção às águas subterrâneas contra contaminações de diversas origens. Desta forma algumas áreas são mais vulneráveis à contaminações que outras. A quantificação da vulnerabilidade é apenas relativa e com critérios muitas vezes subjetivos já que os resultados apresentados nos mapas de vulnerabilidade mostram apenas valores relativos uns aos outros e não valores absolutos, fazendo com que comparações entre áreas distintas seja às vezes difícil. A vulnerabilidade é determinada a partir das características de um dado sistema aquífero [1].

1.1. Definição

A ASTM (American Society for Testing Materials) [2], agência reguladora norte-americana, define vulnerabilidade nas águas subterrâneas como *a facilidade com a qual um dado contaminante pode migrar para as águas subterrâneas ou para um aquífero de interesse em determinadas situações de uso do solo, características do contaminante e condições da área*. Portanto, a vulnerabilidade depende tanto das características do aquífero (litologias, porosidade, etc.) , da área (uso do solo, topografia, etc.) e do contaminante (mobilidade, densidade, etc.).

1.2. Objetivos Globais

Os resultados das metodologias apresentadas a seguir permitem ao gestor de recursos hídricos tomar decisões baseadas no risco de contaminação de aquíferos da região considerada. Estas decisões podem ser por exemplo: onde instalar um poço municipal, zoneamento de uso e ocupação do solo, ou instalação de uma rede de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas. A maioria dos métodos foram desenvolvidos para avaliar áreas a nível regional auxiliando autoridades municipais, estaduais e federais na definição das áreas que necessitam receber um tratamento prioritário quanto à sua proteção ou a possíveis investigações adicionais. No entanto, alguns podem ser aplicados independentemente do tamanho da área considerada.

2. DESCRIÇÃO DAS METODOLOGIAS

A seguir serão descritas três metodologias para se acessar a vulnerabilidade de sistemas aquíferos: (1) DRASTIC, desenvolvida pela agência ambiental norte-americana EPA, (2) AVI, uma maneira mais simplificada, na qual são considerados valores estimados do potencial de recarga do aquífero e a distância entre a superfície topográfica e o lençol freático e (3) GOD, a metodologia que considera o tipo de aquífero considerado, a litologia e a profundidade do lençol freático.

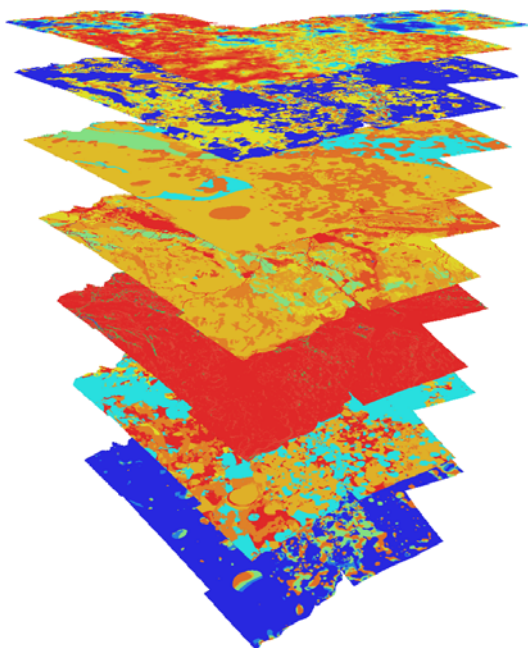
2.1. DRASTIC

DRASTIC foi desenvolvido pela EPA [3] para ser um sistema padronizado de avaliação da vulnerabilidade de aquíferos frente a eventos de poluição. O principal objetivo da metodologia DRASTIC é o de auxiliar na alocação de recursos e na priorização das diversas atividades relacionadas às águas subterrâneas. Utilizando-se mapas de vulnerabilidade, pode-se, por exemplo, definir quais áreas deverão ser monitoradas de maneira mais intensiva num estudo de monitoramento. DRASTIC também pode ser utilizado para definir quais áreas devem ser protegidas para garantir a integridade do aquífero em termos de poluição. O modelo segue as seguintes premissas:

- O contaminante é inserido na superfície.
- O contaminante atinge a água subterrânea através da precipitação.
- O contaminante possui a mobilidade da água.
- A área a ser avaliada precisa ter uma dimensão de no mínimo 40 hectares.

DRASTIC não foi desenvolvido para acessar casos em que o poluente é introduzido em profundidade no aquífero, como por exemplo no caso de vazamentos em tanques enterrados, lagoas de resíduo ou poços de injeção. Esta metodologia não substitui trabalhos de investigação em áreas contaminadas, não permitindo, por exemplo, determinar se um dado local é apropriado para servir de aterro a resíduos industriais. No entanto, pode-se utilizar as informações fornecidas pela metodologia na tomada de decisões para áreas contaminadas.

A metodologia considera sete fatores hidrogeológicos aos quais são atribuídos números r de 1 a 10 dependendo da faixa de valores. Estes são multiplicados por pesos w que variam de 1 a 5, sendo que o fator mais significativo recebe o peso 5 e o menos significativo 1 (vide abaixo). São eles:



1. Profundidade do nível d'água (D). Peso 5 (D=*Depth to Water Table*)
2. Recarga ao aquífero (R). Peso 4 (R=*Net Recharge*)
3. Litologia do aquífero (A). Peso 3 (A=*Aquifer Media*)
4. Tipo de solo (S). Peso 2 (S=*Soil Media*)
5. Topografia do local (T). Peso 1 (T=*Topography*)
6. Textura da zona vadosa (I). Peso 5 (I=*Impact of the Vadose Zone Media*)
7. Condutividade hidráulica do aquífero (C). Peso 3 (C=*Aquifer Hydraulic Conductivity*)

O índice DRASTIC é calculado pela seguinte fórmula (1):

$$\text{Índice DRASTIC} = D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w \quad (1)$$

O menor valor possível é 23, no caso em que os números atribuídos às faixas de valores são todos 1, e o maior valor é 230.

Os índices calculados podem ser utilizados para acessar, de uma maneira relativa, a vulnerabilidade do sistema aquífero à poluição. Quanto maior o índice DRASTIC, tanto maior a vulnerabilidade do aquífero à contaminação. No entanto, um valor baixo do índice não significa que não possa ocorrer contaminação, apenas que a mesma será menos provável e menor que em outras áreas.

2.2. AVI

Nesta metodologia são utilizados para o cálculo do índice de vulnerabilidade os fatores hidrogeológicos potencial de recarga ao aquífero (que considera a condutividade hidráulica do meio, o gradiente hidráulico e a porosidade) e a profundidade do nível d'água. Fatores como a capacidade de atenuação natural do solo não são considerados. Nesta metodologia divide-se a profundidade do nível d'água pelo potencial de recarga, obtendo-se como resultado o tempo de percurso vertical. Este é um valor estimado de quanto tempo um contaminante dissolvido levará para atingir o aquífero. Estes tempos de percurso são divididos em 5 classes. A Tabela 1 mostra as características das classes.

Tabela 1: Classes de Vulnerabilidade para Aquíferos

Vulnerabilidade Intrínseca	Tempo de percurso vertical	Características da Vulnerabilidade do Aquífero
Classe		
Classe 1	< 5 anos	A água chega muito rápido ao aquífero através de material de alta condutividade hidráulica (areia/cascalho).
Classe 2	5 – 10 anos	A água chega rápido ao aquífero, sendo que ambos, o material e a distância ao aquífero, controlam a taxa de recarga.
Classe 3	10 – 100 anos	A água chega devagar ao aquífero sendo que ambos, o material e a distância ao aquífero, controlam a taxa de recarga.
Classe 4	>100 anos	A água chega muito devagar ao aquífero através de material de baixa condutividade hidráulica (silte/argila).
Classe 5	Não ocorre fluxo descendente	A mais baixa vulnerabilidade, com fluxo ascendente ou gradiente próximo a zero.

Para se determinar as áreas que merecem uma atenção especial das autoridades responsáveis pelos recursos hídricos, pode se sobrepor perímetros de proteção de poços aos mapas de vulnerabilidade de aquíferos, traçando polígonos de intersecção.

2.3. GOD

Estas duas metodologias descritas anteriormente requerem uma abundância de dados (dados sobre geologia, profundidade do lençol freático, condutividade hidráulica, porosidade, recarga, uso do solo entre outros), que muitas vezes não se encontram disponíveis, principalmente em países em desenvolvimento. A metodologia GOD (**G**roundwater occurrence, **O**verall lithology of the unsaturated zone, **D**epth to the water table) desenvolvida pela Organização Mundial de Saúde [4] atende justamente a este requisito, o de utilizar informações comumente disponíveis em países em desenvolvimento. As informações utilizadas nesta metodologia são:

1. Ocorrência do lençol freático (livre, confinado, semi-confinado)
2. Litologia da zona vadosa e camadas confinantes
3. Profundidade do lençol freático (espessura da zona vadosa)

Nesta metodologia um índice é atribuído a cada um destes tipos de informação, sendo que o valor 1 é atribuído no caso da vulnerabilidade ser a maior. Estes índices são multiplicados entre si para produzir a classificação final, que é então transformada em vulnerabilidade de aquíferos, variando entre extrema (por exemplo aquíferos livres, rasos e de litologia grosseira) a baixa (aquíferos confinados ou aquíferos livres profundos com solos impermeáveis). A **Figura 1** mostra os componentes da metodologia GOD.

3. ESTUDOS DE CASOS

A seguir serão apresentados estudos efetuados com as três metodologias acima descritas. O primeiro estudo foi efetuado em Ottawa, Ontário, Canadá, o segundo no leste de Ontário, Canadá, e o terceiro em Caçapava, SP, Brasil.

3.1. Drastic (Ottawa)

Devido ao desenvolvimento ocorrido nos últimos anos, as autoridades da cidade de Ottawa, Ontário Canadá, têm se preocupado com a disponibilidade de recursos hídricos para atender à crescente demanda de água. Atualmente estão sendo investigadas novas áreas de exploração de águas subterrâneas, além de uma investigação do grau de contaminação dos recursos hídricos existentes. Para avaliar o risco de contaminação de aquíferos a nível regional e determinar a vulnerabilidade dos mesmos foi desenvolvido um estudo, no qual foi utilizada a metodologia DRASTIC [5].

Os mapas de profundidade do nível d'água, recarga ao aquífero, litologia do aquífero, tipo de solo, topografia do local, textura da zona vadosa e condutividade hidráulica do aquífero elaborados para a área foram sobrepostos através da utilização de um sistema de informações geográficas, e os índices de vulnerabilidade calculados. Os pesos dos parâmetros foram modificados para adaptar a metodologia à região estudada. Pesos maiores foram atribuídos aos parâmetros profundidade do nível d'água e menores aos parâmetros litologia do aquífero e condutividade hidráulica. A **Figura 2** exibe o mapa resultante da avaliação da vulnerabilidade de aquíferos para a região de Ottawa. Regiões em vermelho representam áreas de maior vulnerabilidade.

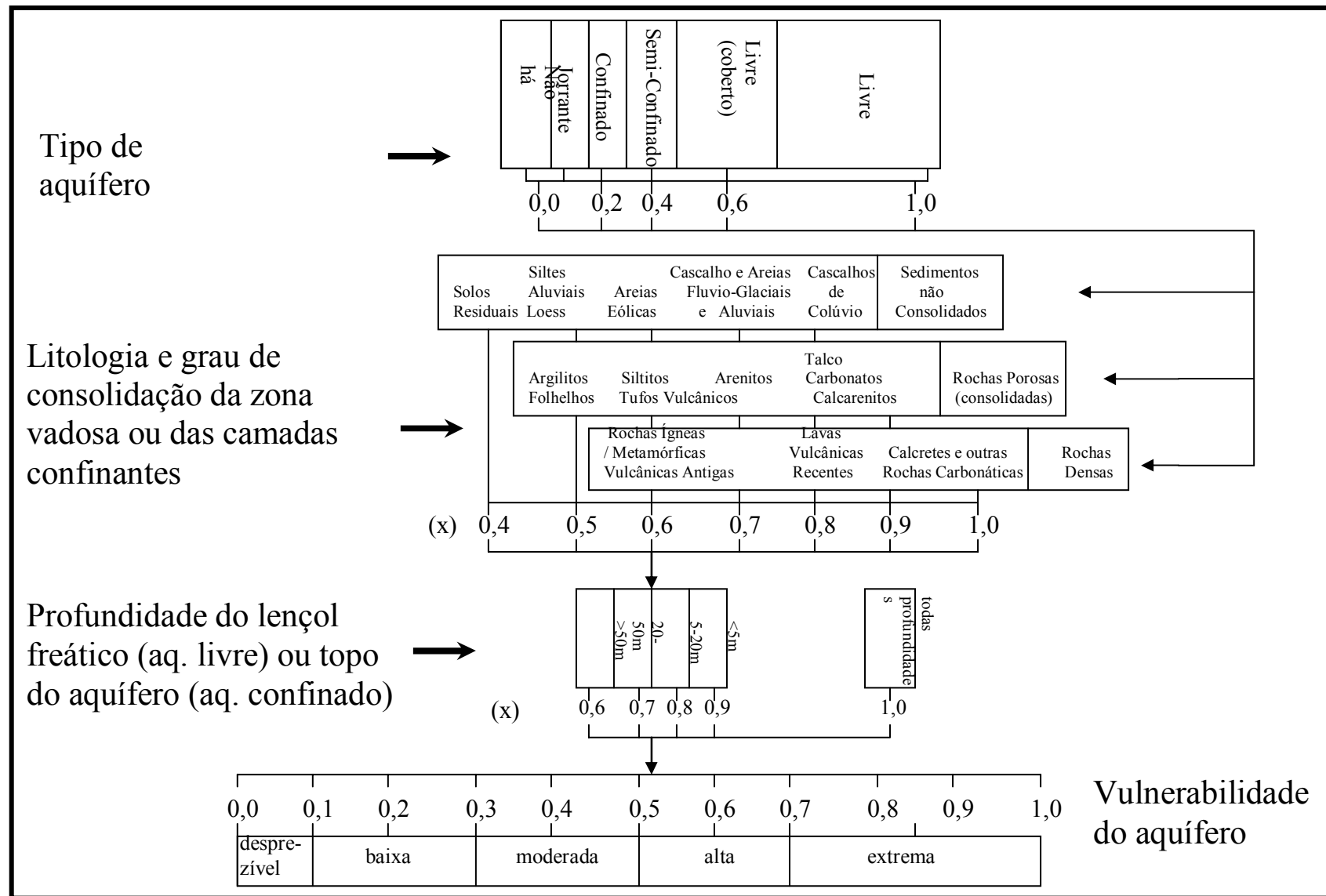


Figura 1: Metodologia GOD para determinação da vulnerabilidade de aquíferos [4].

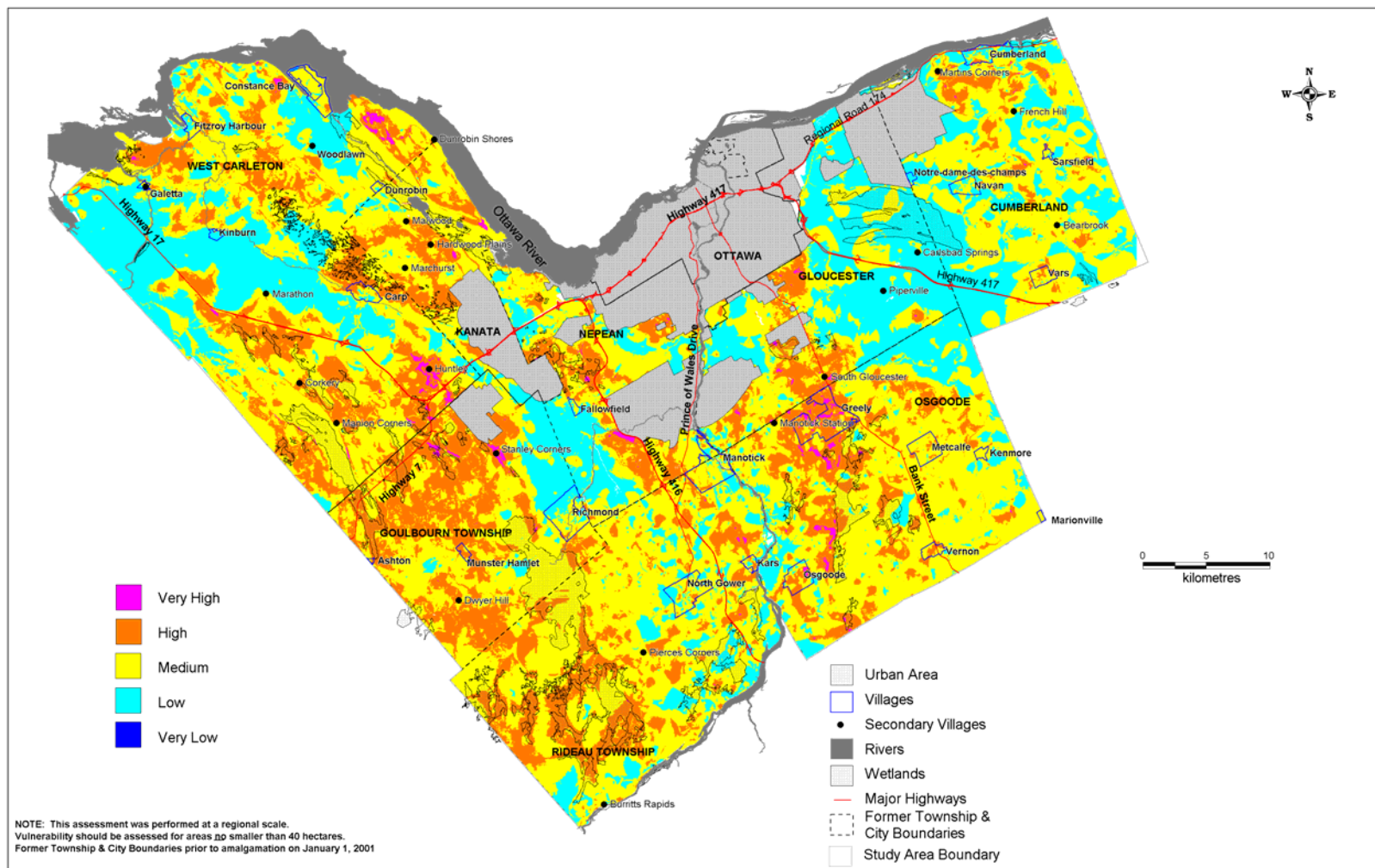


Figura 2: Mapa de vulnerabilidade de aquíferos em região ao sul de Ottawa, Ontário, Canada [5].

3.2. AVI (EOWRMS)

Em 2001 foi desenvolvido no Leste de Ontário um estudo (EOWRMS-*Eastern Ontario Water Resources Management Study*) no qual foram avaliados todos recursos hídricos da região (6800 km²), incluindo tanto águas superficiais como subterrâneas [6]. Os objetivos principais do estudo foram: (1) desenvolver um banco de dados acoplado a um sistema de informações geográficas do estado atual dos recursos hídricos e sua distribuição, (2) elaborar procedimentos de gerenciamento do banco de dados para garantir sua manutenção e atualização, (3) identificar alternativas de distribuição de água com boa relação custo-benefício, (4) apresentar soluções para uma gestão integrada a nível local e regional dos recursos hídricos existentes e (5) desenvolver ferramentas e planos de ação para proteger a qualidade e quantidade de águas e recursos afins.

Para atingir este último objetivo o estudo previu a elaboração de uma análise da vulnerabilidade do aquífero existente na zona de contato entre depósitos fluvio-glaciais e rochas dolomíticas. A vulnerabilidade mapeada (AVI) refere-se apenas à proteção geológica sobreposta ao aquífero, que é função da espessura do material, da condutividade hidráulica vertical e da direção e magnitude do gradiente hidráulico. Como descrito anteriormente, a condutividade hidráulica vertical e o gradiente determinam o valor do potencial de recarga ao aquífero.

A **Figura 3** mostra o mapa de vulnerabilidade do aquífero da zona de contato para a região leste do estado de Ontário. As cores escuras (verde escuro) indicam áreas mais vulneráveis à poluição. A maioria das áreas claras referem-se a regiões onde o gradiente indica uma movimentação ascendente das águas subterrâneas, sendo portanto áreas pouco vulneráveis.

3.3. GOD (Caçapava)

Em trabalho desenvolvido em 1998 pela associação das entidades SABESP, Instituto Geológico (Secretaria do Meio Ambiente) e Waterloo Hydrogeologic Inc. [7] em Caçapava, SP, Brasil, foram avaliados os perímetros de proteção de poços e a vulnerabilidade dos aquíferos da região.

A metodologia GOD foi escolhida para a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos. Foram elaborados mapas de solos superficiais e de profundidade do sistema aquífero. Com base nas informações sobre os aquíferos (livres a semi-confinados) e nestes dois mapas foi utilizada a metodologia. A **Figura 4** mostra o resultado da aplicação desta metodologia na área de estudo.

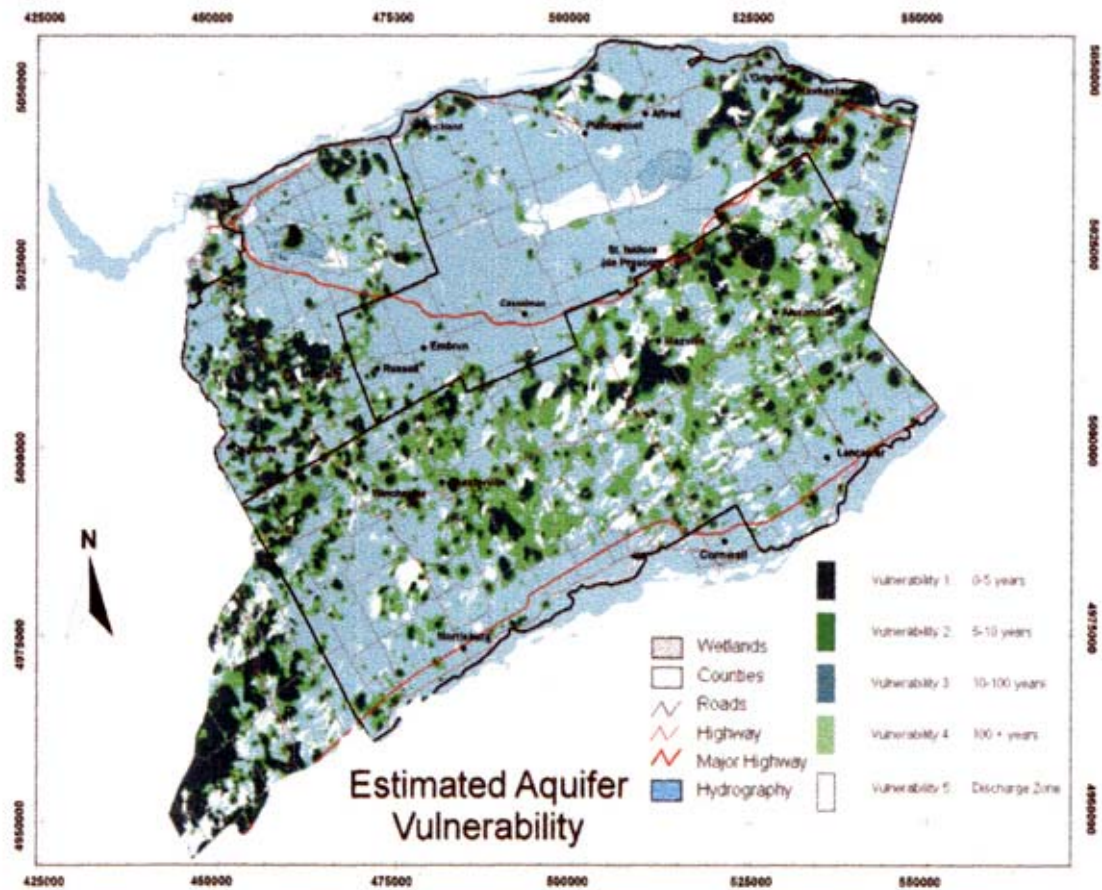


Figura 3: Mapa exibindo a vulnerabilidade de aquíferos de Ontário, Canada.

Áreas escuras indicam uma alta vulnerabilidade dos aquíferos [6].

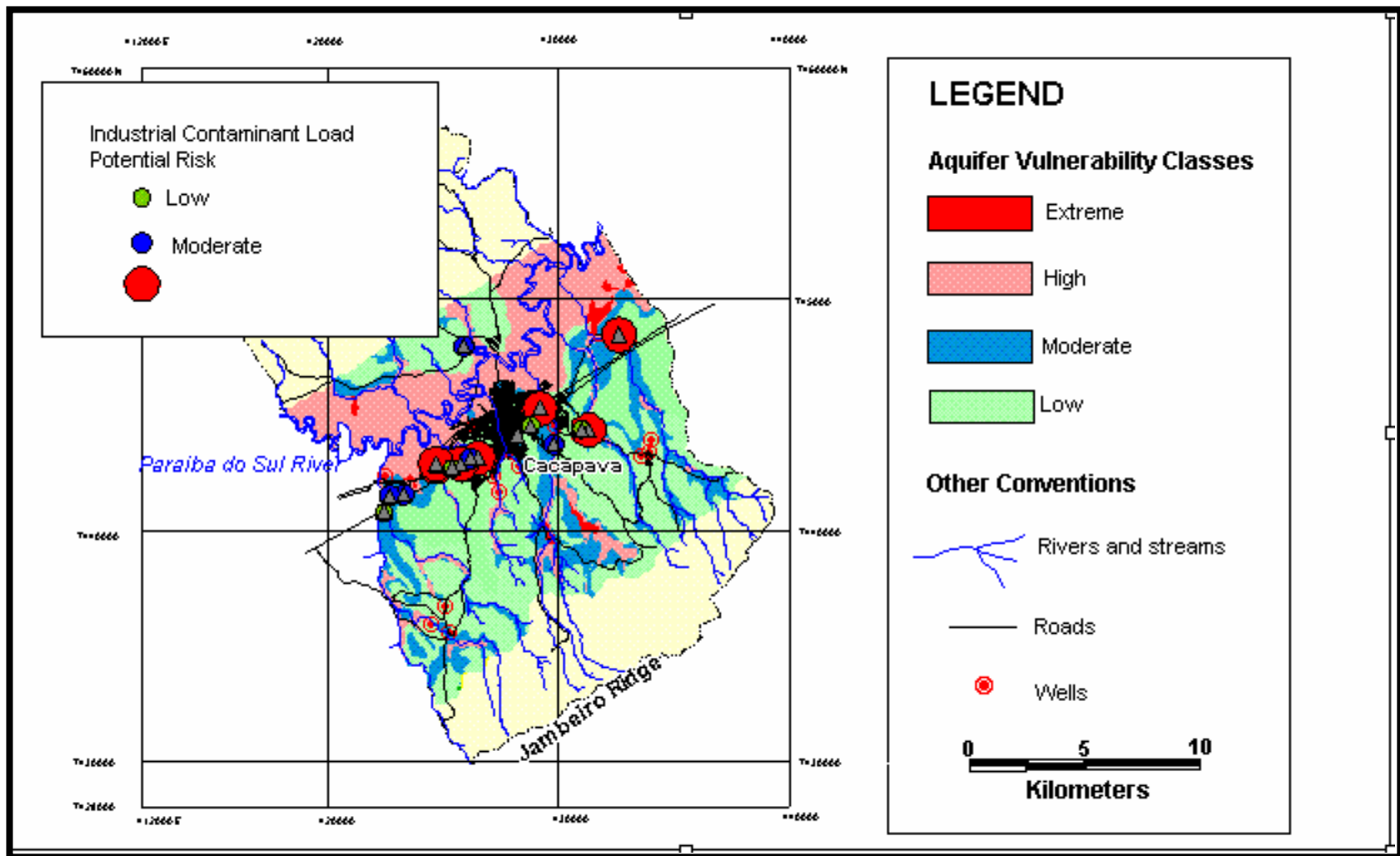


Figura 4: Mapa exibindo a vulnerabilidade de aquíferos na região de Caçapava [7].

4. COMPARAÇÃO DAS METODOLOGIAS

Das metodologias acima descritas a que é mais completa é a DRASTIC, onde são considerados 7 parâmetros. A principal desvantagem é o fato dela não ser muito flexível, fazendo com que os usuários muitas vezes alterem os pesos do parâmetros e executem outras adaptações. Nesta metodologia as variáveis são fatorizadas a um único valor, e, se aplicada sem modificações, pode acontecer que parâmetros mais críticos não influenciem o resultado de maneira apropriada sobrepunhando os outros que não tem tanta importância numa dada região de estudo.

A metodologia AVI considera o potencial de recarga e a profundidade do lençol freático e não requer tantos parâmetros quanto o método DRASTIC. Na determinação do potencial de recarga são considerados condutividade hidráulica, gradientes hidráulicos e porosidade. A consideração da recarga potencial ao aquífero faz com que esta metodologia seja muitas vezes a mais apropriada para se determinar a vulnerabilidade de um determinado aquífero.

A metodologia GOD é a mais simplificada das três apresentadas. É uma metodologia cuja principal vantagem encontra-se na facilidade de sua utilização e no fato de utilizar os parâmetros mais importantes, como profundidade do lençol freático, litologias da zona vadosa e de camadas confinantes e condição do aquífero. É a única metodologia que diferencia um aquífero livre de um confinado. Uma das principais desvantagens da metodologia GOD é o fato de não utilizar a recarga nos cálculos.

Nenhuma metodologia considera conexões a corpos de água superficiais (curto circuito hidráulico) ou variações do nível do lençol freático. Também não são consideradas características específicas dos contaminantes, umidade específica do solo, taxas de precipitação e sua composição química. Em estudos efetuados em escala mais local é necessário, no entanto, que estes parâmetros sejam integrados para se determinar a vulnerabilidade dos aquíferos.

5. CONCLUSÕES

A avaliação de vulnerabilidade para pequenas áreas deve ser efetuada caso a caso, integrando-se as características químicas e físicas de cada contaminante (ou grupos de contaminantes), o tipo de fonte (pontual ou difusa) e a quantidade, meios e taxas de recarga de contaminante para a área e conexões com outros corpos d'água. No caso de estudos regionais deve-se, no entanto, utilizar metodologias como as descritas anteriormente, considerando as vantagens e desvantagens de cada uma. A escolha de uma determinada metodologia vai depender do volume de informações disponíveis, do objetivo de trabalho, da escala e dos recursos disponíveis. Cada região possui características próprias de maneira que as metodologias propostas precisam às vezes sofrer modificações para fornecer resultados de vulnerabilidade confiáveis para uma dada área

Para se efetuar uma boa avaliação da vulnerabilidade de aquíferos é necessário que, na medida do possível, todos fatores hidrogeológicos sejam acessados. Integrando os perímetros de proteção de poços (PPP) pode-se identificar as áreas que merecem uma atenção especial na elaboração do plano de desenvolvimento de uma região. O risco de contaminação causado pelas diversas possíveis fontes de contaminação, como postos de gasolina, indústria química, etc. também precisa ser determinado. Sobrepondo mapas de vulnerabilidade, perímetros de proteção de poços e mapas de localização de possíveis fontes de contaminação, o administrador tem informações em mãos, que lhe permitirão planejar a exploração dos recursos hídricos existentes e sua proteção de maneira mais eficiente

6. REFERÊNCIAS

- [1] Vrba, J., Zaporozec, Guidebook on mapping groundwater vulnerability, IAH publication 16, 1994, 131pg, Hannover, Alemanha.
- [2] ASTM D6030, Standard Guide for Selection of Methods for Assessing Ground Water or Aquifer Sensitivity and Vulnerability, 1996, 8pg., West Conshohocken, PA, EUA.
- [3] Aller, L., Bennett, T., Lehr, J.H., Petty, R., Hackett, G., DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. US E.P.A, EPA/600/2-87/035, 1987, EUA.
- [4] Foster, S.S.D. & Hirata, R.C.A. Groundwater pollution risk evaluation: a methodology using available data, CEPI's – PAHO/WHO, Lima, 78 pg., 1995.
- [5] Abbey, D., Martin, P.J., Banks, W.D., Stratton, B. Aquifer Vulnerability Assessment: The first step in developing an Aquifer Management Strategy for the City of Ottawa. 54th Canadian Geotechnical Conference, 2nd Joint CGS-IAH Groundwater Specialty Conference, September 2001, Calgary, Canada.
- [6] Banks, W.D., Jarvis, I.E., Martin, P.J., Meek, J.W., Mercier, P.R., Stratton, B.C., A Regional Groundwater Management Initiative for Eastern Ontario. Presented at the 2nd Joint IAH-CGS Groundwater Conference. September 2001, Calgary, Canada.
- [7] Martin, P., Gomes, D., Iritani, M., Souza, J.C.S., Guiguer N., Integrated Groundwater Management Using Modelling and GIS. Proceedings of the Groundwater in a Watershed Context Symposium, Part3: Municipal Planning and Implementation. pp. 137-145. Canada Centre for Inland Waters, Burlington, Ontario. December 2 - 4, 1998.