

Proposição Fuzzy-Geoestatística para o Mapeamento da Vulnerabilidade Intrínseca de Aquíferos

Érico Gaspar Lisboa*; Ana Rosa Baganha Barp*; Ronaldo Lopes Rodrigues Mendes*

erico@ufpa.br; anabarp@ufpa.br; rlopes@ufpa.br

Recebido: 25/06/11 – revisado: 13/10/11 – aceito: 12/12/12

RESUMO

O mapeamento da vulnerabilidade intrínseca pode ser obtido pela interpolação de índices sobre um espaço amostral. No entanto, os índices de vulnerabilidade intrínseca (IVI) são limitados quanto a sua capacidade de interpretação, bem como de interpolação, através de técnicas de mapeamento, sujeitos a incertezas. O objetivo deste trabalho é propor a construção de um sistema de inferência fuzzy (SIF), concebendo um IVI fuzzy (IVI^f), que associado às técnicas geoestatísticas, é capaz de produzir mapeamento mais rigoroso e potencialmente mais realístico. Para tanto, o SIF foi aplicação da lógica fuzzy aos parâmetros do sistema GOD, traduzidos por variáveis linguísticas "baixa", "média" e "alta", com funções de pertinência trapezoidal, aferidas, por sua vez, mediante um conjunto de regras empregadas através do modelo clássico de inferência fuzzy Mamdani. O índice foi obtido por método inverso à operação da lógica fuzzy (desfuzzificação), via método do centro de gravidade, originando o IVI^f. Os índices são interpolados por krigagem ordinária a partir da interpretação de semivariogramas empíricos ajustados por modelos matemáticos, evidenciando a correlação espacial da vulnerabilidade através do cálculo do grau de dependência espacial (GD). A acurácia dos índices é calculada pela abrangência do grau de vulnerabilidade (AGV) para IVI^f em relação ao IVI, com aplicação na região metropolitana de Belém. Os resultados indicam que o IVI^f, ajustado por modelo esférico, propiciou GD igual 88,83% e a melhora de AGV em até 88,77%.

Palavras-chave: Sistema de inferência fuzzy. Técnicas geoestatísticas. Mapeamento da vulnerabilidade. Aquíferos.

INTRODUÇÃO

O mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos é um dos principais mecanismos gerenciais adotado na prevenção à contaminação da água subterrânea. Tal mecanismo é efetivado a partir da interpolação de geoinformações como suporte para análise espacial da vulnerabilidade. Essa análise pode ser viabilizada por índices, tônica dos sistemas DRASTIC (ALLER et al., 1987), SINTACS (NAPOLITANO, 1995), GOD (FOSTER; HIRATA, 1988), entre outros, fundamentados no conhecimento hidrogeológico geral do transporte de contaminantes.

Os índices são produtos de modelos lineares que categorizam classes relativas em atributos qualitativos a partir da ponderação de parâmetros. Tais parâmetros caracterizam-se pela representação de uma média de variáveis combinando unidades de medidas distintas (numéricas e não numéricas). Esses índices ignoram a incorporação das proprie-

dades de contaminantes, tais como coeficiente de adsorção e tempo de meia-vida; sendo denominados de índices de vulnerabilidade intrínseca ou natural (IVI).

O IVI pode ser identificado como variável regionalizada, com estrutura espacial de correlação, revelada por semivariograma de natureza empírica, que se trata de ferramenta básica de suporte a técnicas de krigagem, que permitem a interpolação de informações sob o ponto de vista geoestatístico. Essa configuração representa uma das grandes vantagens no uso de índices para geração de um mapa temático de vulnerabilidade, subsidiando a tomada de decisão acerca do planejamento de uso e ocupação do solo a fim de evitar ameaças de processos potencialmente poluidores.

Por outro lado, os índices estão sujeitos a questionamentos em função da avaliação subjetiva associada à ponderação dos correspondentes parâmetros que os compõem, alguns dos quais podem apresentar correlação entre si e efeitos de sobreposição, com a adição de incertezas, ainda que definidos preliminarmente como determinísticos e conceituais.

Universidade Federal do Pará/ Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – UFPA/ PPGE

Determinísticos, porque ignoram as propriedades estocásticas inerentes a variabilidade espaço-temporal, procurando, por outro lado, delimitar faixas de valores dos parâmetros para fundamentar o melhor entendimento da vulnerabilidade. Conceituais, porque buscam uma interpretação física para os diversos subprocessos envolvidos na avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos.

Nesse sentido, faz-se necessária a adoção de um sistema de especialista para tratar as incertezas, com a premissa de melhor estimar o índice de vulnerabilidade e, conseqüentemente, mais bem gerir os recursos hídricos subterrâneos.

No que tange à incorporação de um sistema de especialista, o trabalho de Shouyu e Fu (2003) desenvolveu uma metodologia de reconhecimento de níveis de poluição a partir de uma determinada amostra de valores do índice calculado em comparação à faixa de valores padronizados do índice do sistema DRASTIC. Assim, os valores dos índices de uma amostra foram relacionado a níveis de poluições (1, 2,...n), baseado em lógica *fuzzy*, que interpretam variáveis lingüísticas cujas classes foram descritas como: “mais difícil de ser poluída” a “mais fácil de ser poluída”. Tal procedimento foi aplicado na Península de Dalian, na China, mostrando-se de fácil aplicação e compreensão.

Di Martino, Sessa e Loia (2005) e Uricchio, Giordano e Lopez (2004), utilizando técnicas de geoprocessamento, realizaram o mapeamento de um aquífero em uma área municipal da Itália a partir de técnicas hierárquicas *fuzzy* acopladas ao sistema SINTACS. Esse procedimento foi viabilizado para priorizar o grau de risco oferecido pelas fontes potencialmente poluidoras. Para tanto, foram considerados vários atributos como mobilidade e natureza do pesticida, entre outros, aos quais foram atribuídos pesos lingüísticos diferenciados. A partir do processamento dessas informações, foram confeccionados mapas de vulnerabilidade, risco à poluição com relação à fontes existentes e a mensuração de incertezas dos parâmetros utilizados.

Dixon (2005), com o emprego da mesma técnica de hierarquia *fuzzy* supracitada, apresentou um método empírico para determinar a vulnerabilidade de aquíferos regionais. Para tanto, realizou uma análise de sensibilidade dos parâmetros do SINTACS e dos métodos de hierarquização, sendo viabilizadas diferentes funções de pertinência do modelo *fuzzy*.

Outras proposições, como Afshar et al. (2007) e Ebtehaj (2002) trataram a abordagem difusa a partir de um índice de vulnerabilidade *fuzzy* com a construção de um conjunto de regras com-

posto dos parâmetros hidrogeológicos do sistema DRASTIC. Tais parâmetros foram aferidos por um sistema de inferência *fuzzy* (SIF), considerando-os variáveis de entrada, categorizadas em graus “baixo”, “médio” e “alta”. O índice foi interpolado pelo método das isolinhas através do aplicativo *geoshow* do software MATLAB® 7.0, produzindo o mapa de vulnerabilidade.

O mesmo procedimento proposto por Afshar et al. (2007) foi utilizado por Pathak et al. (2009) no mapeamento da vulnerabilidade do aquífero superficial de Kathmandu Valley, Nepal. Os resultados do SIF foram interpolados no espaço amostral da região e comparados ao sistema DRASTIC. Desse modo, os autores concluíram que o SIF tem potencial para facilitar a modelagem da vulnerabilidade em escala regional e pode ser usado para outras localidades, especialmente no caso de escassez de dados. No entanto, deve-se exigir a incorporação de variáveis de entrada apropriadas e base de regras adequadas para cada região.

Os trabalhos supracitados, revisados na literatura especializada, apresentaram limitações no estudo da variabilidade espacial do grau de vulnerabilidade. Desse modo, inviabiliza-se a adequada estimativa da vulnerabilidade em locais não amostrados, o que permitiria, se bem feita de forma extensiva e com validação correspondente, realizar uma melhor gestão dos recursos hídricos de uma dada região por meio de mapas temáticos mais confiáveis.

Assim, o objetivo deste trabalho é propor a construção de um SIF aplicado ao mapeamento da vulnerabilidade intrínseca de aquíferos regionais com vistas a contribuir na superação de algumas fragilidades e dificuldades identificadas em trabalhos anteriores.

A proposta considera o índice de vulnerabilidade intrínseca (IVI) como uma variável regionalizada, interpretado por semivariograma e ajustado por modelos teóricos que melhor evidenciem a correlação espacial desse atributo. Por fim, escolhido o modelo, faz-se a interpolação da variável utilizando a krigagem ordinária como técnica para o mapeamento da vulnerabilidade.

Para construção do SIF, a proposta adota uma abordagem *fuzzy*. Consideram-se os parâmetros do sistema GOD como variáveis de entrada, as quais são traduzidas por meio de variáveis lingüísticas “baixa”, “média” e “alta” e interpretadas por funções de pertinência trapezoidal, aferidas por um conjunto de regras e operadas através do modelo clássico de inferência *fuzzy* Mamdani.

Uma vez estabelecido o SIF calcula-se um índice obtido pelo processo inverso da lógica *fuzzy*

(desfuzzificação) através do método de centro de gravidade. Com o índice obtido, é realizada a interpolação com a produção, então, do mapa de vulnerabilidade e posterior destaque para a acurácia do SIF construído por meio da abrangência do grau de vulnerabilidade. Tal processo metodológico, descrito com maiores detalhes na seção subsequente, foi aplicado na região metropolitana de Belém.

PROCESSO METODOLÓGICO

Para melhor fundamentar a tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos, esta proposta quantifica o IVI a partir da teoria dos conjuntos *fuzzy*, adotando como referência um sistema de especialista introduzida por Zadeh (1965).

Essa teoria adota o uso simultâneo de variáveis quantitativas e qualitativas. As variáveis quantitativas são associadas aos parâmetros hidrogeológicos ponderados por meio de um sistema paramétrico mensurado por valores numéricos; já no que concerne às variáveis qualitativas, há a atribuição de valores a partir de interpretações não numéricas.

Ambos os conjuntos de variáveis são interpretados por meio de variáveis linguísticas (Π) traduzidas por funções de pertinência ($\mu_{\Pi}(x_i)$) podendo adquirir formas do tipo trapezoidal, triangular ou gaussiana aferidas por valores entre 0 e 1. Tais valores inscritos em uma das formas de $\mu_{\Pi}(x_i)$ prognosticam o grau de interferência dessas variáveis, considerando-as como variáveis de entrada (x_i) em um sistema.

Contudo, este sistema consiste em um conjunto de regras (R_n) estabelecido através de um operador matemático mínimo (**Mín**) para um conectivo lógico “E”. A construção de sentenças “SE” e “ENTÃO”, que modelam a aplicação do **Mín**, caracteriza o modelo clássico de Mamdani (1974). A literatura ainda expõe outro tipo de modelo clássico, como o de Larsen (1981), bem como outros modelos de interpolação podendo ser consultado o trabalho de Sugeno e Takagi (1985) para essa fundamentação bibliográfica.

Por outro lado, a variável de saída é um conjunto *fuzzy*, mesmo para o caso de uma entrada *crisp* (um número real, ou par de um número real). Esse fato é que sugere a “desfuzzificação”, processo que transforma a variável linguística de saída em valores numéricos, obtida, para os modelos clássicos, pelo método do centro de gravidade, entre outros, como visto em Mizumoto (1982).

Para efetuar tal proposta, utiliza-se o sistema GOD (SIGOD) e suas variáveis x_G , x_O e x_D , prescritas por Foster e Hirata (1988), como x_i . Em seguida, aplica-se a proposta difusa, que consiste na organização do domínio de x_i como difusas, cuja faixa de valores é dado pelo próprio SIGOD. Qualificam-se os domínios de x_i em três subdomínios cujos Π são: baixo (**B**), médio (**M**) e alto (**A**). A fim de compor as respectivas variáveis Π , define-se as variáveis do SIGOD a partir de critérios vistos a frente.

Critério de adoção das variáveis Π para x_G

Para o domínio da variável x_G , que identifica o tipo de confinamento da água subterrânea ou condição do aquífero, considera-se os aquíferos confinados ou sob pressão, que se encontram, invariavelmente, subjacentes aos aquíferos livre e aquíferos e/ou aquícludes, como os mais protegidos quanto à contaminação. Esses aquíferos criam uma proteção adicional, favorecendo a geração de grandes fluxos ascendentes das águas e, por conseguinte, impedem a infiltração de contaminantes.

Deste modo, x_G “**B**” é definido como aquele que pode ser representado por uma camada confinante que deve restringir o movimento de contaminantes no interior de aquíferos confinados. Consequentemente, x_G “**M**” é um aquífero semi confinado, cuja proteção natural para a infiltração de contaminantes tem uma certa capacidade de permitir o acesso ao sistema hídrico. Um aquífero livre ou não confinado apresenta uma alta “**A**” capacidade de infiltração para absorção do contaminante, por apresentar-se naturalmente desprotegido, e, portanto, mais vulnerável quanto ao risco de ser poluído.

Critério de adoção das variáveis Π para x_O

A definição do domínio da variável x_O , a qual refere-se à litologia do material de cobertura da superfície, adota como principal ênfase a probabilidade de existirem fraturas bem desenvolvidas, uma vez que essas podem favorecer o fluxo preferencial, mesmo em estratos porosos como alguns arenitos e calcários.

A possibilidade de tal fluxo é considerada o fator preponderante no aumento da vulnerabilidade e na redução da atenuação dos contaminantes, já que a sobrecarga hidráulica (do fluido) é responsável por muitos casos de contaminação.

Todavia, o aumento da vulnerabilidade dá-se pela exposição da superfície à carga de contami-

nantes em função da litologia que a compõe, isto é, quanto mais poroso o estrato de cobertura do aquífero, mais susceptível ele será à contaminação. Por outro lado, o processo de atenuação está na interação de processos físicos (filtração mecânica, sorção e intercâmbio de íons) com o solo, que retardam o processo de contaminação e reações químicas com os contaminantes e que podem reduzir total ou parcialmente as suas concentrações.

Assim, para que o x_o seja "B", denota-se que o estrato deve ser não consolidado (sedimentar) a consolidado sem fraturas. O valor de x_o é considerado "M" quando a estratigrafia passa a ter uma granulometria com probabilidades de fluxo preferencial, como por exemplo o siltito em um estrato consolidado ou em uma areia eólica com uma formação não consolidada. Para um atribuição do x_o "A", o fluxo preferencial deve penetrar facilmente o estrato em função do seu grau de fraturamento, como é o caso de uma rocha calcária.

Critério de adoção das variáveis Π para x_D

Por fim, o parâmetro que se refere à distância até o lençol freático ou o teto do aquífero confinado (x_D) é determinado pelo caminho através do qual o contaminante deve se deslocar até atingir o aquífero mais superficial.

Logo, quanto mais raso for o lençol, mais facilmente este será contaminado. Assim, considera-se o valor de x_D "B" quando a distância até o lençol freático for suficientemente pequena para que o contaminante se desloque e rapidamente atinja o aquífero. O mesmo raciocínio é estendido na consideração do x_D "M" e "A", salvaguardando uma parametrização razoável à concepção dessa variável.

A essas variáveis Π , associam-se as respectivas funções de pertinência cuja consideração adotada na teoria dos conjuntos fuzzy é que $\mu_{\Pi}(x_G)$, $\mu_{\Pi}(x_o)$ e $\mu_{\Pi}(x_D)$ sejam as funções que determinam com que grau as variáveis x_G , x_o e x_D estejam em "B", "M" e "A" para cada uma delas.

Assim, ao adotar, por exemplo, a variável x_G "B", esta não assumirá tal atribuição de forma conceitual, posto que: $\mu_B(x_G) = 1$, onde x_G será totalmente "B"; e quando $0 \leq \mu_B(x_G) \leq 1$, significa que x_G já é parcialmente "B"; quando $\mu_B(x_G) = 0$, x_G não é "B". O mesmo raciocínio é seguido pelos outros parâmetros juntamente para as demais variáveis Π . Assim, constrói-se a tradução da modelagem fuzzy através de $\mu_{\Pi}(x_i)$ que pode assumir as formas trapezoidal, triangular ou gaussiana.

Tradução de x_i por Π via FPTr

Para a variável x_G situada entre 0,0 e 0,20, tem-se $\mu(x_G) = 1$, isto é, um aquífero cuja grau de confinamento da água subterrânea reflete uma baixa vulnerabilidade. Para a faixa de valores $0,20 \leq x_G \leq 0,40$, a variável passa a não ser totalmente "B" e nem "M" (Figura 1). Não obstante, têm-se que, para x_G entre 0,40 e 0,60, ocorre a representação de um aquífero semiconfinado a não confinado, com o valor de $\mu(x_G) = 1$, ou seja, tal aquífero apresenta uma vulnerabilidade mediana.

Por fim, um aquífero não confinado coberto a não confinado, no intervalo de 0,60 a 0,80, a $\mu(x_G)$ representa um valor cuja vulnerabilidade é parcialmente "M" a "A".

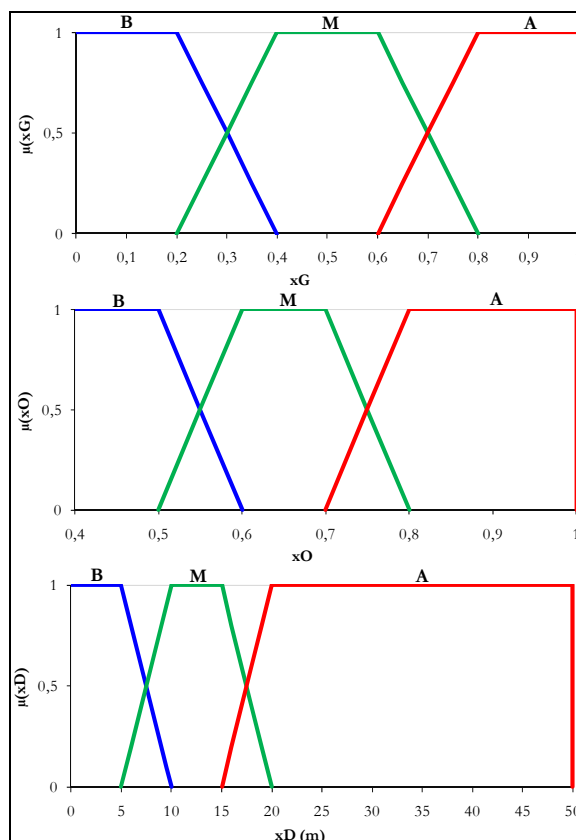


Figura 1 - Variáveis de entrada com $\mu_{\Pi}(x_i)$ na forma trapezoidal

Da mesma forma, é realizado tal procedimento para a variável x_o , considerando-se a forma trapezoidal de $\mu_{\Pi}(x_i)$, conforme as variáveis Π para uma faixa de valores do SIGOD (Π podem ser iguais a "B", "M" e "A").

Em seguida, como feito para a variável x_G , para que x_O represente baixa condição de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos, $x_O = 0,00$, delimita-se uma faixa de valores por $0,40 \leq x_O \leq 0,50$, isto é, com $\mu(x_O) = 1$, significando que o estrato de cobertura apresenta solos residuais ou siltosos, para formações não consolidadas, e xisto para uma formação consolidada.

Quando x_O apresenta-se no intervalo de 0,50 a 0,60, o grau qualitativo da vulnerabilidade é parcialmente "B" a "M" para as características litológicas em formações consolidadas como o siltito e tufo vulcânico, bem como para as formações magmáticas/ metamórficas e vulcânicas em estratos consolidados.

Para formações litológicas que se caracterizam como de alta vulnerabilidade, onde estão os cascalhos de leques aluviais (formações sedimentares), calcários (rochas porosas) e calcários cársticos (rochas duras) para formações consolidadas, a faixa de valores é obtida a partir de $0,80 \leq x_O \leq 1,00$. Da mesma forma, a variável x_D é qualificada de acordo com Π adotadas em função da faixa de valores do SIGOD. Portanto, a partir de uma função de pertinência trapezoidal (FPT), determina-se com que grau x_G , x_O e x_D estão em "B", "M" e "A" para cada x_i .

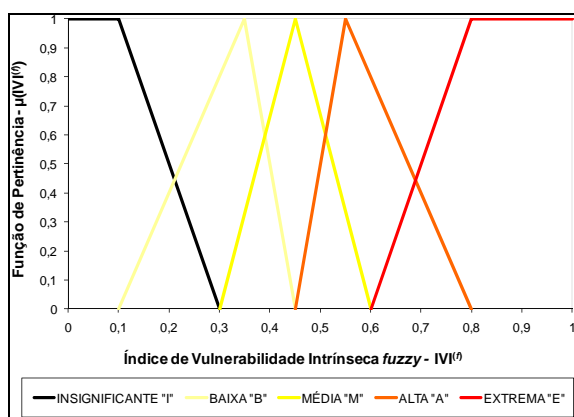


Figura 2 - Função de pertinência da variável $IVI^{(f)}$

O processamento do SIF é estabelecido pelo número de R_n dado por meio da relação que envolve o número de x_i do SIGOD e as linguísticas (x_{Π}). Assim, tem-se que $R_n = x_{\Pi}^{x_i}$, logo, é obtido um total de 27 regras. Esse conjunto de regras para um SIF dá-se por meio do estabelecimento de uma base de regras que consiste em um conjunto fuzzy "SE" e "ENTÃO"; assim, tem-se:

$$\text{"SE"} \ x_{1\Pi} \ \text{"E"} \ x_{2\Pi} \ \text{"E"} \ x_{3\Pi} \ \text{"ENTÃO"} \ IVI^{(f)} \quad (1)$$

onde Π é a variável linguística, descrita pela tabela 1.

Tabela 1 - Modelagem do SIF por R_n na obtenção do $IVI^{(f)}$

Regras R_n	ENTRADA			SAÍDA
	"SE" x_G	"E" x_O	"E" x_D	"ENTÃO" $IVI^{(f)}$
R_1	B	B	A	I
R_2	B	B	M	I
R_3	B	B	B	I
R_4	M	M	A	B
R_5	M	M	M	B
R_6	M	M	B	M
R_7	A	A	A	M
R_8	A	A	M	A
R_9	A	A	B	E
R_{10}	M	B	A	B
R_{11}	M	B	M	B
R_{12}	M	B	B	B
R_{13}	A	B	A	B
R_{14}	A	B	M	M
R_{15}	A	B	B	M
R_{16}	B	M	A	I
R_{17}	B	M	M	I
R_{18}	B	M	B	I
R_{19}	A	M	A	M
R_{20}	A	M	M	M
R_{21}	A	M	B	A
R_{22}	B	A	A	I
R_{23}	B	A	M	I
R_{24}	B	A	B	B
R_{25}	M	A	A	B
R_{26}	M	A	M	M
R_{27}	M	A	B	M

Para quantificar o $IVI^{(f)}$, após a inferência dos conjuntos de R_n , escolhe-se o método do centro de gravidade como "desfuzzyficador", tendo $\mu_{\Pi}(u_i)$ como a forma trapezoidal para Π igual a "I" e "E", e triangular, para as demais variáveis linguísticas adotadas (Figura 2).

A variável de saída (u_i) tem cinco $\mu_{\Pi}(u_i)$ as quais denotam os termos linguísticos referentes a cinco classes de vulnerabilidade dos aquíferos a contaminação. A primeira classe relaciona-se à qualificação de insignificante "I" que é caracterizada pela presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo de água subterrânea.

A segunda classe é categorizada como baixa "B", sendo que os aquíferos seriam vulneráveis somente a contaminantes conservadores, em longo

prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados.

A classe média "M" enfatiza que a água subterrânea é vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados. A classe é alta "A" quando o aquífero ou sistema de aquíferos é vulnerável a muitos contaminantes em muitas condições de contaminação.

Por outro lado, quando o aquífero ou sistema de aquíferos for vulnerável à maioria dos contaminantes com impacto rápido em muitos cenários de contaminação a vulnerabilidade é categorizada como extrema "E". Ressalta-se que não há a necessidade de se normalizar u_i , uma vez que a faixa de valor tem intervalo de 0 a 1. No entanto, as variáveis Π adotadas pelo IVI, desta vez, são geradas por um indicador de uma perspectiva conceitual mais acurada com a adoção da teoria dos conjuntos *fuzzy* (Π podem ser iguais a "I", "B", "M", "A" e "E").

Por fim, após a obtenção do IVI^(f), adota-se a interpolação espacial por krigagem, obtendo-se o mapeamento da vulnerabilidade à contaminação de aquífero. Todo o processo metodológico adotado para a concepção do IVI^(f) é modelado pelo código computacional Matlab[®] 7.0 (MATLAB, 1999). A interpolação tem aporte do *software Gold Surfer*[®] 8.0.

Mapeamento pela geoestatística

Para o mapeamento da vulnerabilidade, utilizaram-se técnicas geoestatísticas de krigagem, preconizadas por Journel e Huijbregts (1978), na interpolação espacial do IVI e IVI^(f). A técnica de krigagem é a mais usual na modelagem numérica das águas subterrâneas, já que é um estimador do tipo BLUE (*best linear unbiased estimator*).

Nobre (2006) enfatiza que a krigagem ordinária, utilizada nesta proposição, é a mais divulgada nos vários campos do conhecimento.

O método assume que a variável a ser analisada seja normalmente distribuída através de um determinado domínio e oferece estimativas mais prováveis em um ponto qualquer para uma dada distribuição de valores medidos e conhecidos, isto é, para o conjunto amostral.

Anderson e Woessner (1992) complementaram que tal procedimento diferencia-se dos demais por considerar uma estrutura espacial da variável, ou seja, sua localização, e também por se apresentar como estimador de erro de interpolação na forma de desvio padrão. Para melhor entendimento acerca do método de krigagem o trabalho de Deutsch e Journel (1992) pode ser consultado.

Considerando o IVI^(f) e IVI, como variáveis regionalizadas, procede-se ao mapeamento da vulnerabilidade, precedido de uma análise da dependência espacial da vulnerabilidade; a partir do ajuste do semivariograma ($\gamma(\mathbf{h})$) para as direções 0°, 45°, 90° e 135°; pelos modelos teórico Esférico (Sph), Exponencial (Exp) e Gaussiano (Gau), obtendo-se os valores de **a** (alcance – *range*), **C** (patamar – *still*), **C₀** (efeito pepita – *nugget effect*) e **C₁** (diferença entre **C** – **C₀**), via código computacional Variowin[®] 2.2.

Para a busca do modelo que melhor se adéque à representação do grau de vulnerabilidade intrínseca, calcula-se o grau de dependência espacial (**GD** = **C₁/C₀** + **C₁**) como indicativo de um modelo com maior estrutura de continuidade espacial, bem como subsídio para a escolha do índice que deve ser utilizado para mapear a vulnerabilidade.

Escolhido o índice mais representativo, é feita a sua interpolação por meio da técnica de krigagem, obtendo-se o mapeamento da vulnerabilidade intrínseca. Em seguida, calcula-se o valor de abrangência do grau de vulnerabilidade (AGV), a fim de prognosticar a vulnerabilidade na região de estudo, bem como a acurácia do IVI^(f) em comparação ao IVI.

Área de aplicação

A área de aplicação abrange os municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Izabel do Pará e Santa Bárbara do Pará, com 2.536,88 km², que compõem a região metropolitana de Belém (RMB), situada entre as coordenadas geográficas 01° 03' e 01° 32' de latitudes sul e 48° 11' e 48° 39' de longitudes oeste, limitada ao sul com o rio Guamá e a oeste com a baía de Guajará (Figura 3), de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2002).

No entanto, esta proposta considera 70,0% da área da RMB em face da limitação do conjunto de dados amostrais. Desse modo, catalogaram-se os dados primários de nível estático (N.E) de um conjunto amostral de 229 poços amazonas e 61 freáticos, bem como suas respectivas localizações geográficas lidas em UTM (Figura 3 – Área C – RMB).

No tange aos poços dispersos na área analisada, faz-se importante dissertar sobre o que constata o trabalho de CPRM (2001) ao se referir sobre os poços freáticos e amazonas. Os poços freáticos são freqüentes em conjuntos habitacionais em condomínios que utilizam o recurso hídrico subterrâneo para suprir a carência do abastecimento público de água superficial.

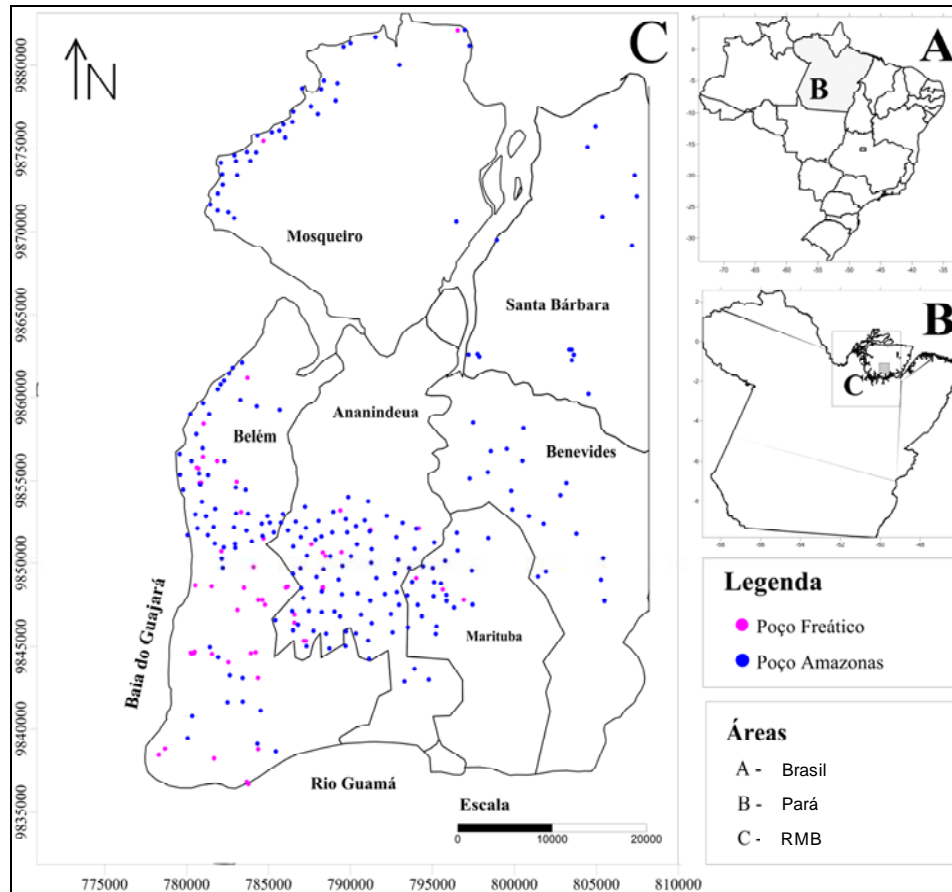


Figura 3 - Localização da área de aplicação: região metropolitana de Belém (RMB)

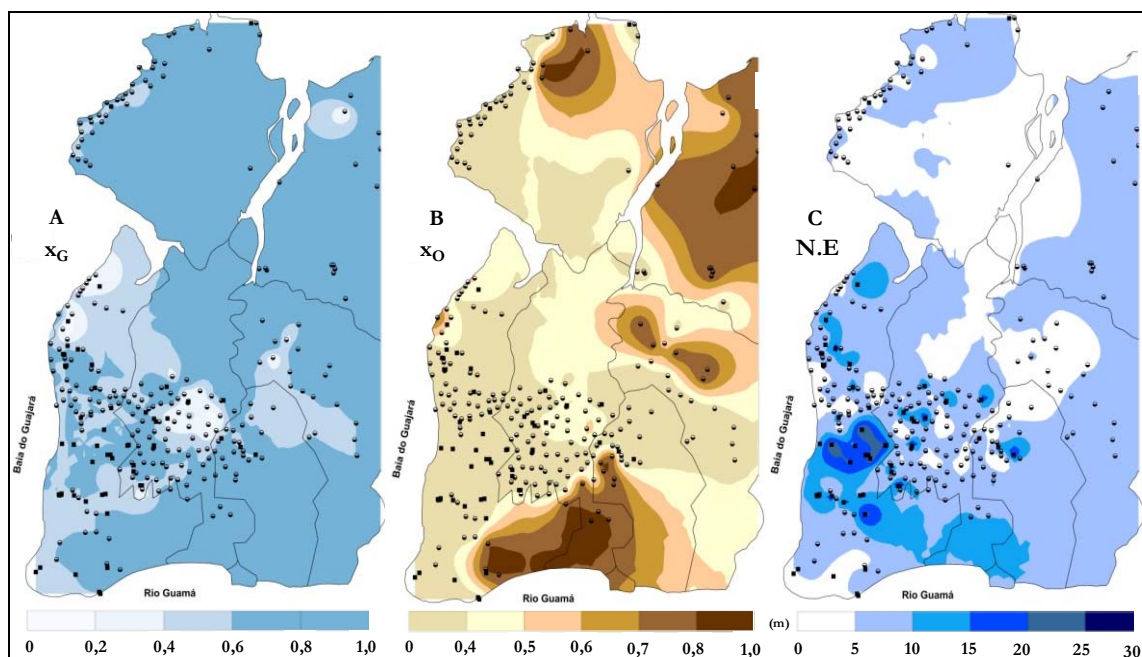


Figura 4. A - Mapa do grau de confinamento (x_G); B - litologia (x_O) e; C - distância até o lençol freático pelo nível estático (N.E)

Em muito desses conjuntos, o trabalho de CPRM (2001) averiguou que as captações são abandonadas em face da quantidade de ferro excessiva ou por falta de bomba. Ainda assim, ao longo do tempo, a água do lençol freático torna-se passível de ser contaminada pelas fossas localizadas próximas a poços de captação do aquífero livre.

O respectivo trabalho revelou, ainda, que os poços amazonas são comumente utilizados pela população de baixa renda e sujeita as mesmas condições das pessoas que utilizam poços tubulares rasos.

Hidrogeologia local

A formação hidrogeológica local é composta, basicamente, de sedimentos do mioceno inferior ao quaternário recente, os quais guardam vários sistemas aquíferos. Essas unidades geológicas são conhecidas como formação pirabas, grupo barreiras e pós-barreiras, cujos sistemas vêm sendo explotados para abastecimento público, industrial e por particulares, com poços tubulares que variam de 12 m a 300 m de profundidade.

Segundo CPRM (2001), o domínio de aquíferos da RMB e circunvizinhanças divide-se em três. O primeiro é do tipo permoporoso, constituído pelos sedimentos da cobertura detritico laterítica, que, por sua vez, está encimada por alúvios e colúvios. Corresponde à unidade aquífero superior, formada por níveis argilo-arenosos e inconsolidados, existentes no intervalo entre 0 e 30 metros. São aquíferos livres cuja recarga se dá diretamente através das precipitações pluviométricas, enquanto a descarga efetiva-se através dos rios, pelas fontes, evapotranspiração e poços.

Adicionalmente, o domínio é caracterizado por sedimentos marinhos, fossilíferos, compostos por argilas calcíferas de coloração cinza-esverdeada e por leitos de calcário duro, cinza-esbranquiçado e que se alternam sucessivamente com camadas de arenito calcífero, siltitos e areias existentes no intervalo entre 80 m e 180 m.

O segundo corresponde aos sedimentos do grupo barreiras, com litotipos de natureza heterogênea, indo desde argilitos até arenitos grosseiros interaleitados por argilas, lateritos e níveis argilosos caulinizados e com espessura máxima da ordem de 80 m. São camadas arenosas de espessuras variáveis, intercaladas com níveis mais argilosos, não permitindo grandes vazões (de 15 m³/h a 80 m³/h). Os aquíferos são de natureza livre e semi livre, podendo, localmente, serem confinados. A recarga dá-se por contribuição das camadas sobrepostas ou através

da precipitação nas áreas em que estão aflorando. Os aquíferos barreiras e pós-barreiras não estão conectados hidráulicamente. Em síntese, esse domínio constitui-se, predominantemente, de camadas repetitivas de arenitos de cor cinza-esbranquiçada, granulometria fina à conglomerática, com intercalações mais espessas de argilas e siltitos esverdeados.

O terceiro domínio corresponde às unidades da formação pirabas, formado por dois sistemas aquíferos do tipo multicamada, denominado de pirabas superior e inferior, respectivamente. Para melhor entendimento acerca da hidrogeologia regional da RMB, o trabalho de CPRM (2001) pode ser consultado.

Mapeamento das variáveis do SIGOD

Na compilação da variável x_G na RMB, houve a indicação de que os aquíferos não confinados (coberto) apresentaram uma frequência amostral de 71,03% (0,80 – 1,00). Para 17,93% dos dados analisados, prognosticou-se que o sistema de aquífero da área a ser mapeada encontra-se semiconfinado (0,40 – 0,60). Apenas 11,03% da área apresenta-se como aquífero confinado (0,0 – 0,20). (Figura 4A).

Dados levantados da variável x_O apontam que 77,24% apresentaram uma formação que variou de argilosa a solos residuais (0,35 – 0,40). Por outro lado, 11,72% tiveram composição do tipo areia aluvial (0,70 – 0,80), enquanto 11,03% apresentaram fração de silte e areia (0,50 – 0,60).

O mapeamento da variável x_O apresentou uma faixa de valores entre 0,35 e 0,80, adaptadas para a realidade litológica da região em questão (Figura 4B). Por conseguinte, procedeu-se ao mapeamento do nível estático (N.E), o que permitiu a caracterização da variável que identifica a profundidade do aquífero até o lençol freático (Figura 4C). A confecção dos mapas foi realizada pela interpolação das variáveis do SIGOD pelo *software Gold Surfer*® 8.0 utilizando o método de krigagem.

RESULTADOS

Aplicada a lógica *fuzzy* ao índice de vulnerabilidade, fez-se a interpolação tanto do IVI⁽⁰⁾ como do IVI, considerando-os variáveis regionalizadas. O mapa variográfico dos índices, na forma de *pixels* (Figura 5), detectou uma anisotropia espacial da vulnerabilidade no sentido N-E e S-W. Por outro lado, no sentido N-W e S-E, a anisotropia é menor,

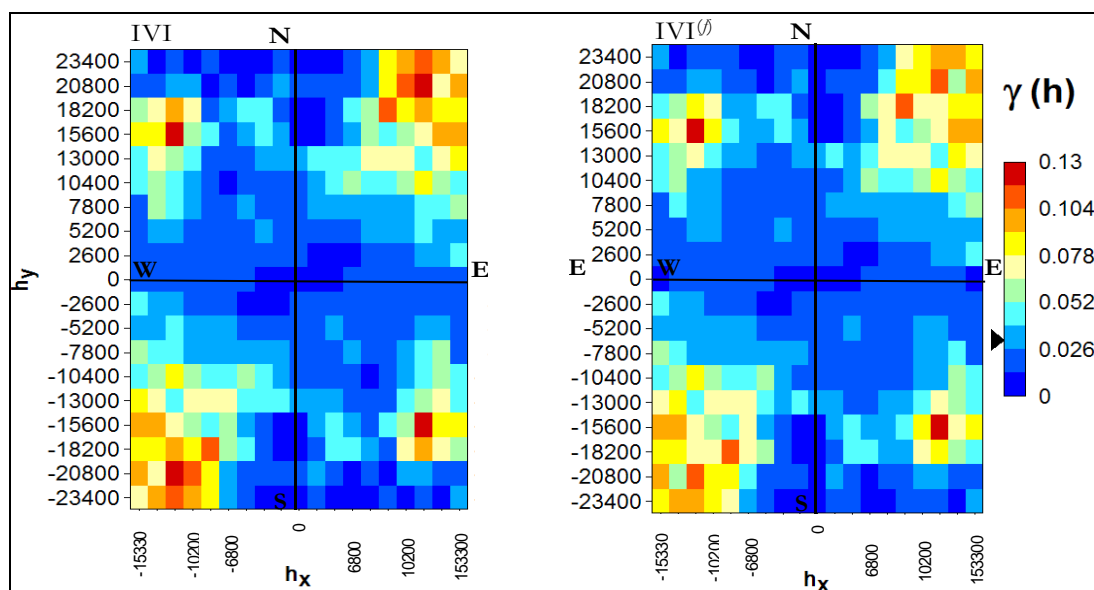


Figura 5 - Mapa variográfico para as variáveis: A – IVI e; B – IVI^0

não influenciando no semivariograma experimental. A direção adotada será E-W onde a função variográfica ($\gamma(h)$) garante uma dependência espacial das amostras consideradas até 0,029 para uma distância horizontal (h_x) de 1700 e vertical (h_y) de 2600.

De tal modo que, para $\gamma(h) \geq 0,029$, não fica evidenciada a estruturação de correlação espacial, cuja variância é da ordem de grandeza de 0,029 (Figura 5). Tais resultados foram estimados por 71.818 pares de pontos plotados com uma distância múltipla inteira de valor 1(h) e número de incremento de defasagem (*lags*) igual a 13.

Assim sendo, o semivariograma do IVI (direção 0°) indicou um patamar (C) das diferenças entre as 290 amostras igual a 0,02593, bem como o valor de C_0 igual 0,0064, prognosticando um GD de 75,32% (Figura 6A). Para o IVI^0 , C foi de 0,030814, e GD igualou-se a 79,23% (Figura 6B).

Tabela 1- Direção 0° e tolerância angular 90°

Índice	Modelos	a	C	C_0	GD (%)
IVI	Sph	21780	0,02764	0,005100	81,55
	Exp	20714	0,02877	0,003245	88,72
	Gau	14168	0,02774	0,006747	75,68
IVI^0	Sph	17163	0,03755	0,004196	88,83
	Exp	29000	0,03755	0,007396	80,30
	Gau	19720	0,03595	0,007396	79,43

De posse do semivariograma experimental, foi efetuado, pelo código computacional Variowin 2.21, o ajuste ao modelo teórico que melhor representasse a variável em estudo. Com a disposição dos pares de pontos no variograma, os ajustes foram realizados para as direções 0°, 45°, 90° e 135° através dos modelos teóricos Sph, Exp e Gau, cujos valores de a, C, C_0 e GD, para IVI e IVI^0 , são descritos nas tabelas 1, 2, 3 e 4.

Tabela 2 - Direção 45° e tolerância angular 90°

Índice	Modelos	a	C	C_0	GD (%)
IVI	Sph	28130	0,03000	0,00660	78,00
	Exp	29000	0,02970	0,00650	78,11
	Gau	20300	0,03000	0,00660	78,00
IVI^0	Sph	25810	0,03600	0,00701	80,52
	Exp	29000	0,04000	0,00680	83,00
	Gau	20300	0,03920	0,00680	82,65

Tabela 3 - Direção 90° e tolerância angular 90°

Índice	Modelos	a	C	C_0	GD (%)
IVI	Sph	26680	0,024940	0,00630	78,57
	Exp	29000	0,02876	0,00660	77,05
	Gau	20300	0,03000	0,00660	78,00
IVI^0	Sph	22910	0,03720	0,00440	88,17
	Exp	29000	0,04000	0,00640	84,00
	Gau	19430	0,03720	0,00680	81,72

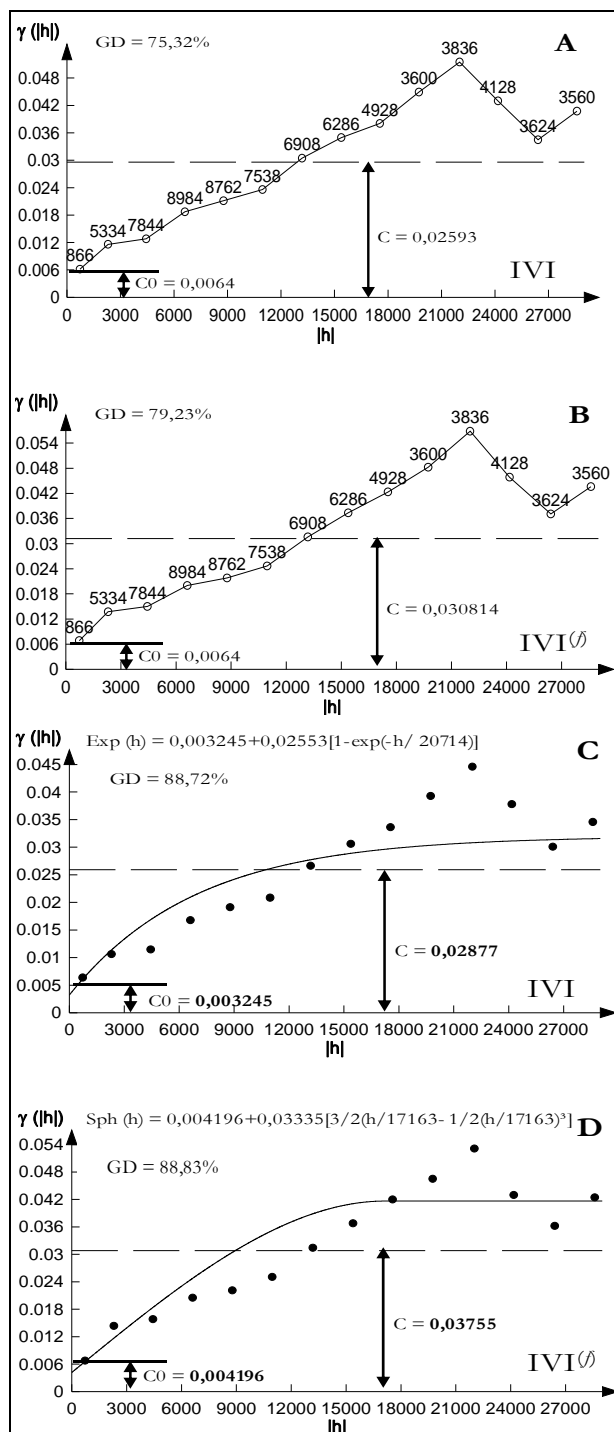


Figura 6 - Semivariograma experimental: A – IVI e; B – IVI^(f); e ajustes por modelos: C – Exponencial (Exp); D – Esférico (Sph)

Tabela 4 - Direção 135° e tolerância angular 90°

Índice	Modelos	a	C	C ₀	GD (%)
IVI	Sph	27793	0,03000	0,00600	80,00
	Exp	29000	0,03000	0,00360	88,00
	Gau	20205	0,03000	0,00600	78,00
IVI ^(f)	Sph	25935	0,03905	0,00560	85,66
	Exp	26633	0,03346	0,00680	79,68
	Gau	20785	0,04000	0,00669	83,29

O ajuste realizado pelo modelo Exp foi o que obteve maior grau de dependência espacial para o atributo IVI (Figura 6C) igual a 88,72%, em comparação ao semivariograma experimental, sem ajuste, cujo GD foi igual a 75,32%.

Por outro lado, para o IVI^(f), o ajuste mais representativo foi realizado pelo modelo Sph, cujo GD foi igual a 88,83% (Figura 6D). A interpolação do índice de vulnerabilidade *fuzzy*, sem ajuste, o grau de dependência espacial foi inferior quando ajustado pelo modelo esférico, denotando um valor de 79,39%. Ambos os modelos escolhidos consideraram a tolerância angular igual a 90° e a direção do vetor h igual a 0°.

Assim realizou-se o mapeamento da vulnerabilidade na RMB pelo IVI e IVI^(f) (Figura 7). A abrangência de uma área de 845,64 km² foi mapeada como grau de vulnerabilidade “B” pelo IVI, sendo reduzida pelo modelo *fuzzy* para uma área de 450,15 km².

A abrangência de uma área de 845,64 km² foi mapeada como grau de vulnerabilidade “B” pelo IVI, sendo reduzida pelo modelo *fuzzy* para uma área de 450,15 km². Por outro lado, o IVI^(f) mostrou-se conservador ao ampliar a abrangência de áreas em graus “M” e “A”, em até 20,82% e 1,78%, respectivamente. O mapeamento através de IVI^(f) ajustado por Sph para o grau “E” de vulnerabilidade abrangiu uma área de 185,77 km², enquanto foi mapeada uma área de 11,05 km² pelo IVI ajustado pelo modelo Exp (Figura 7).

Tabela 5 - Direção 0° e tolerância angular 90°

Grau	Área de Abrangência (km ²)				AGV (%)
	IVI - Exp	%	IVI ^(f) - Sph	%	
I	11,06	0,68	0,00	0,0	-
B	845,64	52,22	450,15	27,80	-30,52
M	417,92	25,81	637,67	39,38	20,82
A	333,67	20,61	345,76	21,35	1,78
E	11,05	0,68	185,77	11,47	88,77
Total	1669,24	100,0	1669,24	100,0	-

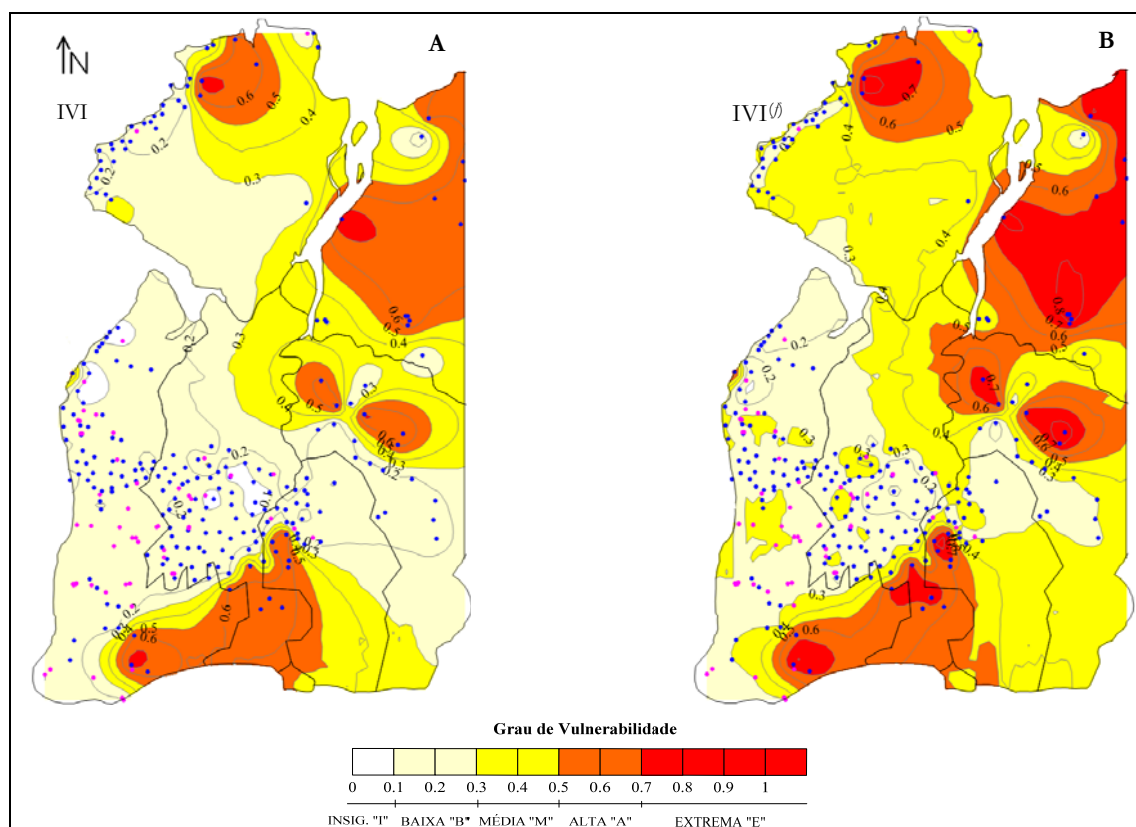


Figura 7 - Mapa da vulnerabilidade intrínseca com concepção *fuzzy*-geoestatístico: A - IVI - Exp; B - IVI^(f) – Sph

Como mostrado na tabela 5, o grau “E” de vulnerabilidade, mapeado pelo IVI^(f), aumentou em 88,77% em comparação ao IVI. Da mesma forma o grau “M” cujo aumento da abrangência de área foi de 20,82%.

Por outro lado, houve um decréscimo significativo ao mapear o grau “B” de 30,52%, bem como segundo o grau “I”, que não foi mapeado pelo IVI^(f).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O mapeamento da vulnerabilidade sugerido, para fins gerenciais dos recursos hídricos subterrâneos, a fim de alcançar um grau de proteção para o aquífero na RMB, é aquele que adota a concepção integrada *fuzzy*-geoestatística. A partir dessa concepção, o IVI^(f) é interpolado e processado pela krigagem ordinária a partir do ajuste do semivariograma pelo modelo Sph para a direção 0° e tolerância angular 90°.

A metodologia desenvolvida, que teve como aporte o uso da lógica *fuzzy*, associada a técnicas

geoestatísticas de interpolação, é passível de ser novamente aplicada em outros sistemas de aquíferos, considerando os aspectos da inacessibilidade e capacidade de atenuação de contaminantes.

No entanto, para determinadas configurações hidrogeológicas, a base do conhecimento pode ser readequada ao intervalo das faixas de valores das variáveis linguísticas, no que tange aos parâmetros de entrada, bem como do conjunto de regras. Ainda assim, a mudança no uso de modelos de inferência *fuzzy* pode provocar significativas alterações nos resultados finais e no mapa gerado.

Por outro lado, a aplicação de metodologia *fuzzy* deve ser realizada com observância aos critérios de “fuzzyficação” das variáveis de entrada, que, são sustentadas pelos parâmetros do SIGOD. O resultado do IVI^(f) pode ser testado utilizando os mais diversos métodos que calculam o valor de saída, quando, faz-se uso do modelo clássico de inferência *fuzzy*, cujos valores são totalmente distintos dos modelos de interpolação.

Por fim, consubstanciadas as recomendações anteriores, o uso da geoestatística requer teste com os outros métodos de interpolação, posto que

estes podem se diferenciar da técnica de krigagem ordinária, a qual foi utilizada nesta proposta.

Desta forma, os valores da abrangência do grau de vulnerabilidade apresentaram resultados diferenciados. A técnica que obteve melhor **GD** poderá ser a mais indicada para o mapeamento da vulnerabilidade intrínseca, além de ser recomendado, em adicional, o estudo do erro médio, máximo e do erro médio quadrático a partir das estimativas feitas pela krigagem, segundo procedimentos de validação cruzada.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo e Apoio à Pesquisa do Estado do Pará (FAPESPA) e Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), pelo apoio financeiro com concessão de bolsa de estudo para realização desta pesquisa (Edital nº 021/2008). Aos revisores da RBRH.

REFERÊNCIAS

- AFSHAR, A.; MARINO, M. A.; EBTEHAJ, M.; MOOSAVI, J. Rule-based fuzzy system for assessing groundwater vulnerability. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, v. 133, n. 5, p. 532-540, 2007.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, H. J.; PETTY, J. R.; HACKETT, G. *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. USA: USEPA, 1987. 622 p. USEPA-600/2-87-035.
- ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W. *Applied Groundwater Modeling*. San Diego, CA: Academic Press., 1992. 381 p.
- CPRM. *Projetos de Estudos Hidrogeológicos da Região Metropolitana de Belém e Adjacências*. Belém: CPRM, 2001. 110 p.
- DEUTSCH, C. V.; JOURNAL, A. G. *GSLIB. Geostatistical software library*. Oxford: Oxford University Press, 1992.
- DI MARTINO, F.; SESSA, S.; LOIA, V. A fuzzy-based tool for modelization and analysis of the vulnerability of aquifers: a case study. *International Journal of Approximate Reasoning*, v. 38, p. 99-111, 2005.
- DIXON, B. Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool. *Applied Geography*, v. 25, n. 4, p. 327-347, 2005.
- EBTEHAJ, M. *Rule-based fuzzy systems for assessing groundwater vulnerability*. 2002. MS thesis - Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran, 2002.
- FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. Lima, Peru: WHO, 1988. (WHOPAHO/ HPE-CEPIS Technical Manual).
- IBGE. *Área territorial oficial. Resolução no. 5, de 10 de outubro de 2002*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/areaterritorial/resolucao.shtm>>. Acesso em: 5 dez. 2010.
- JOURNAL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. *Mining Geostatistics*. New York: Academic Press, 1978.
- LARSEN, P.M. *Industrial Applications of Fuzzy Logic Control*. London: Academic Press, 1981.
- MAMDANI, E.H. Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. *Proceedings of the IEE Control and Science*, v. 121, p. 298-316, 1974.
- MATLAB. *Language of technical computing: Fuzzy logic toolbox user's guide*. Natick, Mass: MathWorks, 1999.
- MIZUMOTO, M. Fuzzy Inference using max-min composition in the Compositional Rule of Inference. In: GUPTA, M. M.; SANCHEZ, E. (Ed.). *Approximate Reasoning in Decision Analysis*. New York: North-Holland, 1982. p. 67-76.
- NAPOLITANO, P. 1995. *GIS for aquifer vulnerability assessment in the Piana Campana, southern Italy, using DRASTIC and SINTACS methods*. 1995. 172 p. MSs Thesis - ITC, Enschede, The Netherlands, 1995. 172 p.
- NOBRE, R. C. M. *Avaliação de Risco para o Uso e Proteção de Aquíferos*. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Macció. 2006. 296 p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- PATHAK, D. R.; HIRATSUKA, A.; AWATA, I.; CHEN, L. Groundwater vulnerability assessment in shallow aquifer of Kathmandu Valley using GIS based DRASTIC model. *Environmental Geology*, v. 57,

n. 7, p. 1569-1578, 2009. DOI: 10.1007/s00254-008-1432-8.

Key-word: Fuzzy inference system; geostatistical techniques; vulnerability mapping.

SHOUYU, C.; FU, G. A DRASTIC-based fuzzy pattern recognition methodology for groundwater vulnerability evaluation. *Hydrology and Science Journal*, v. 48, n. 2, p. 211-220, 2003.

SUGENO, M.; TAKAGI, T. Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modelling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 15, n. 1, p. 116-132, 1985.

URICCHIO, V. F.; GIORDANO, R.; LOPEZ, N. A fuzzy knowledge-based decision support system for groundwater pollution risk evaluation. *Journal of Environmental Management*, v. 73, n. 3, p. 189-197, 2004.

ZADEH, L. Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353, 1965.

Fuzzy-Geostatistics Approach for Mapping the Intrinsic Vulnerability of Aquifers

ABSTRACT

Intrinsic vulnerability mapping can be done by interpolation of indexes on a sample space. However, the rates of intrinsic vulnerability (RIV) are limited in their capacity to interpret and interpolate using mapping techniques, and are sensitive to uncertainties. The objective of this study is to propose the construction of a fuzzy inference system (FIS), designing a fuzzy RIV (RIV^f), which associated with geostatistical techniques can produce rigorous and potentially more realistic maps. Therefore, the FIS was used by "fuzzyfication" system parameters GOD, being translated by "low", "medium" and "high" linguistic variables, read by trapezoidal membership functions, as measured by a set of rules and operated by the classical model of Mamdani fuzzy inference. The index was obtained by "defuzzyfication" via the center of gravity method, yielding RIV^f . The indices are interpolated by ordinary kriging, and interpreted by semivariogram settings with mathematical models, showing the spatial correlation of vulnerability by calculating the degree of spatial dependence (SD). The accuracy of the index is calculated by the breadth of the degree of vulnerability (BDV) to RIV^f in relation to the RIV being applied in the metropolitan region of Belem. The results indicate that the RIV^f , adjusted by spherical model, allowed SD equal to 88.83% and an improvement of BDV up to 88.77%.