

UTILIZAÇÃO DE APLICAÇÕES INFORMÁTICAS EM CARTOGRAFIA AMBIENTAL E ANÁLISE DE SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS: EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

Alain P. Francés⁽¹⁾ e Eduardo A. Paralta⁽²⁾

Resumo - A utilização de tecnologias de informação geográfica, que permitem a aquisição e processamento de dados georeferenciados e a sua manipulação e análise para a elaboração de mapas temáticos e implementação de sistemas de apoio à decisão, são actualmente ferramentas indispensáveis em qualquer estudo no domínio do Ambiente e dos Recursos Hídricos. A aplicação de metodologias integradas permite uma melhor compreensão da multiplicidade de fenómenos que influenciam os sistemas naturais. No presente trabalho indicam-se vários exemplos de aplicação de SIG como ferramenta de representação e análise de informação na forma de cartas de qualidade ambiental no que se refere à contaminação agrícola dos recursos hídricos subterrâneos. Aplicaram-se um conjunto de metodologias: Vulnerabilidade DRASTIC/Índice de Susceptibilidade e Geoestatística apoiadas por Sistemas de Informação Geográfica para cruzamento de dados e mapeamento de resultados.

Palavras-chave: Hidrogeologia, SIG, vulnerabilidade, modelação estocástica

⁽¹⁾ Licenciado em Geologia. Departamento de Hidrogeologia, Instituto Geológico e Mineiro, Estrada da Portela, Apartado 7586, 2721-866 Alfragide. Tel. 21 471 89 22, Fax 21 471 89 40. e-mail: francés.alain@igm.pt

⁽²⁾ Licenciado em Geologia Aplicada e do Ambiente. Departamento de Hidrogeologia, Instituto Geológico e Mineiro, Estrada da Portela, Apartado 7586, 2721-866 Alfragide, Tel. 21 471 89 22. Fax 21 471 89 40. e-mail: eduardo.partalta@igm.pt

1 - INTRODUÇÃO

Os Recursos Hídricos Subterrâneos, apesar de constituírem o maior reservatório de água doce do planeta, constituem uma reserva limitada e vulnerável em termos de qualidade. A pressão sobre este recurso tem diversas origens, sendo as principais os abastecimentos públicos e o consumo industrial, agrícola e a preservação dos ecossistemas.

As necessidades dos vários sectores económicos são cada vez maiores gerando conflitos entre os utilizadores do recurso hídrico. O estudo de um sistema hidrogeológico não pode portanto limitar-se apenas a caracterizar os aspectos quantitativos e qualitativos, mas deve também abranger os aspectos económicos, sociais e ambientais, tendo como objectivo fornecer meios para implementar uma política de gestão e de preservação dos recursos hídricos a longo prazo (Figura 1).

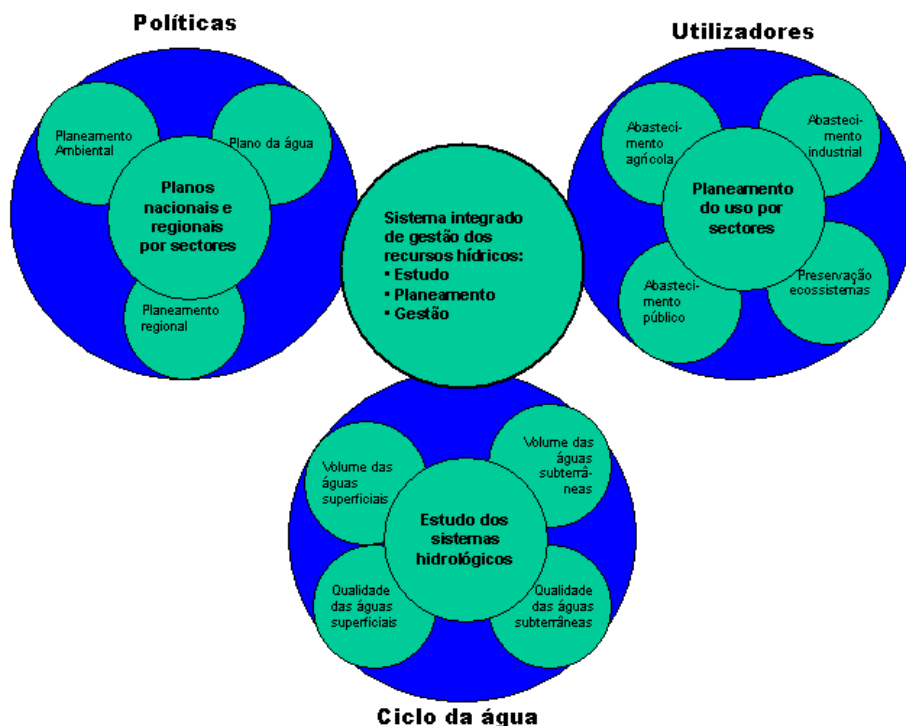


Figura 1 – Sistema integrado de estudo, planeamento e gestão dos recursos hídricos (ENGELEN e KLOOSTERMAN, 1996)

Assim, o estudo de um sistema hidrogeológico envolve a gestão, o processamento e a interpretação de dados de diversa natureza: a) ambientais; b) geocientíficos; c) económicos; d) sociais; e) séries temporais; f) parâmetros espaciais, obtidos em formatos analógicos e digitais e provenientes de várias fontes (Quadro 1).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), cujas funções principais são o armazenamento, a representação e a análise de dados georeferenciados, têm demonstrado ser uma ferramenta essencial neste tipo de estudos hidrogeológicos, uma vez que permitem a interligação entre objectos gráficos e dados alfanuméricos. Possibilitam ao utilizador

questionar e analisar o sistema, obtendo respostas rápidas a pesquisas específicas. Permitem também a criação de mapas temáticos e o cruzamento da informação. A rapidez, a facilidade de visualização, a fiabilidade, a precisão e o grau de pormenor são os atributos que fazem destes sistemas uma ferramenta versátil de apoio ao planeamento e tomada de decisão por parte das entidades responsáveis pela gestão e ordenamento do território.

Quadro 1

Tipo de dados a integrar no estudo de um sistema hidrogeológico

| Dados de superfície e do subsolo | Séries Temporais | Hidrodinâmica |
|---|---|--|
| Topografia Geologia Solos Uso do solo Parâmetros hidrogeológicos Ensaios de bombagem Dados geofísicos Logs ... | Níveis piezométricos Qualidade química Fácies química Parâmetros bacteriológicos ... | Comportamento hidráulico Linhas de fluxo Balanço entradas/saídas Área de recarga e descarga ... |
| Usos | Diversos | |
| Quantidade extraídas Tipo de uso ... | Dados meteorológicos Dados sobre contaminantes (quantidades aplicadas, tipo de pesticidas,...) | |

Na presente comunicação ilustram-se alguns resultados processados com o apoio de ferramentas informáticas sobre trabalhos que o Departamento de Hidrogeologia do Instituto Geológico e Mineiro tem desenvolvido na região de Serpa, desde há vários anos e, mais recentemente, no âmbito do Projecto de *Estudo dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Alentejo* (1996-1999).

A região de rochas gabróicas da margem esquerda do Rio Guadiana, entre Serpa e Brinches (60 km²), corresponde ao sector oriental do Sistema Aquífero dos “Gabros de Beja”. Durante 3 anos procedeu-se à caracterização hidrogeológica destas formações incluindo (PARALTA, 2000): a) análises químicas de elementos maiores e metais pesados; b) caracterização dos usos do solo e das necessidades de água para abastecimento público; c) avaliação da contaminação por nitratos; d) avaliação da produtividade/rendimento das captações; e) determinação da vulnerabilidade à contaminação e f) pesquisas geofísicas e sondagens mecânicas para instalação de uma rede preliminar de monitorização piezométrica e de qualidade.

O objectivo dos trabalhos é aprofundar o conhecimento hidrogeológico dos aspectos particulares do complexo gabro-diorítico, susceptíveis de garantir um abastecimento compatível com as necessidades locais, em termos de quantidade e qualidade.

2 - ORGANIZAÇÃO DO BANCO DE DADOS

O banco de dados utilizado está organizado em folhas de cálculo temáticas (registo dos pontos de água, química, usos, ensaios de caudal,...) no formato Excel® (Figura 2). Apesar de ser prático e de fácil uso para o utilizador, as operações de selecção e manipulação dos dados em folhas de cálculo comportam alguns riscos relativamente à integridade dos dados.

The image shows a screenshot of Microsoft Excel with two worksheets visible. The top worksheet is 'TABELAS.XLS' and the bottom is 'ENSAIOS.XLS'. Both contain data tables with multiple columns and rows.

Figura 2 – Folhas de cálculo Excel® organizadas em tabelas hidrogeológicas

Uma solução alternativa passa pela construção de uma base de dados que permite um melhor controle sobre a organização e a qualidade do armazenamento dos dados, evitando repetição e permitindo procuras mais rápidas e precisas.

A criação de interfaces para comunicar com os vários utilizadores é outra vantagem das bases de dados. Assim, é possível efectuar as operações de introdução dos dados através de formulários amigáveis em substituição do preenchimento directo numa tabela. Estes formulários permitem a criação de pequenos programas de controlo dos dados, como por exemplo impossibilidade de associar um concelho a um distrito ao qual não pertence, criação de uma chave única para cada ponto de água, verificação das coordenadas em função do número da folha da carta escolhida, etc.

Com o desenvolvimento das interfaces gráficas do utilizador (GUI), não são necessários grandes conhecimentos informáticos para montar e gerir uma base de dados usando *software* como o Access®. No entanto, a implementação de sistemas sobre os quais deverão trabalhar vários utilizadores em simultâneo, que serão consultados via Internet e deverão armazenar

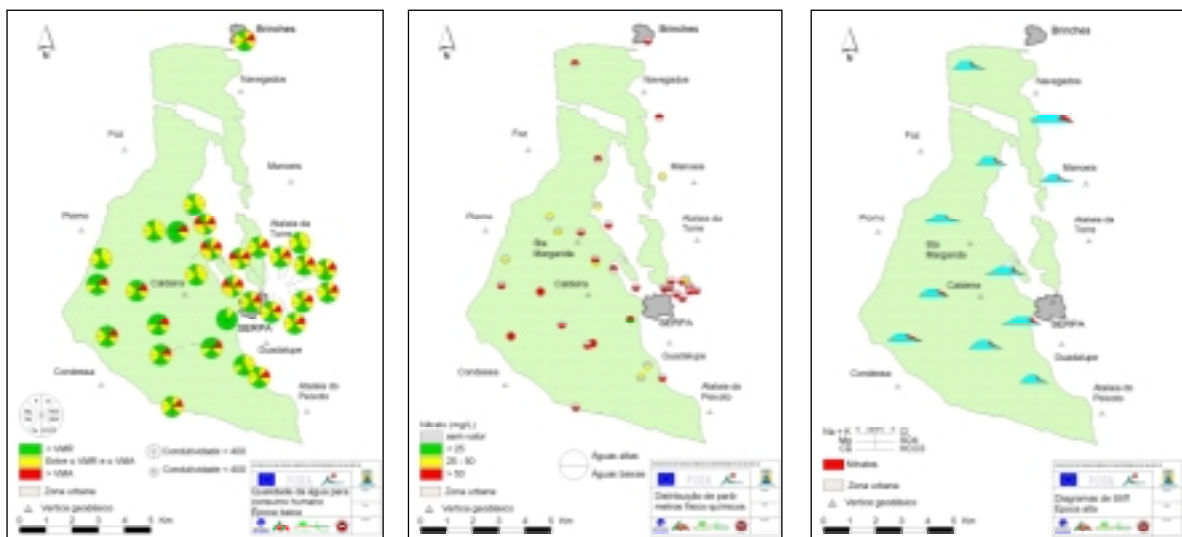
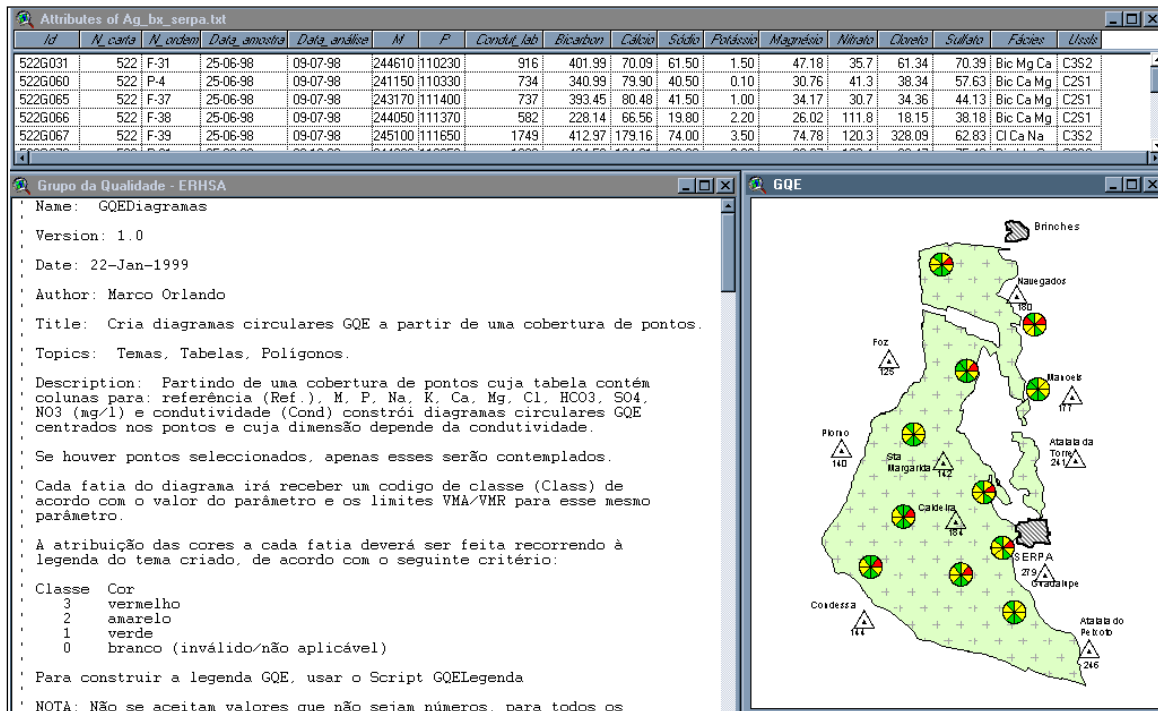


Figura 4 – Representação gráfica da qualidade das águas subterrâneas (PARALTA, 2000)

4 - FERRAMENTAS DE ESTUDO E DE PREVENÇÃO DA CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

4.1 - Considerações gerais

As ferramentas de prevenção da poluição e da contaminação das águas subterrâneas adquiriram nas últimas duas décadas cada vez maior importância na gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos, não só devido ao aumento da pressão sobre os aquíferos pela diversificação e extensão geográfica das actividades antrópicas, mas também devido às limitações tecnológicas e aos altos custos que implica a reabilitação dos aquíferos. Com a finalidade de manter a qualidade química das águas subterrâneas, criaram-se um conjunto de ferramentas de que fazem parte os mapas de vulnerabilidade, os mapas de risco e a

delimitação de perímetros de protecção das captações (GOGU e DASSARGUES, 2000; HIRATA e REBOUÇAS, 1999). Os primeiros pretendem definir espacialmente o grau de protecção de um aquífero à poluição de origem natural ou antrópica. Os segundos correspondem ao cruzamento dos mapas de vulnerabilidade com o inventário das zonas de poluição potencial das águas subterrâneas, que correspondem a focos de poluição pontual, linear ou difusa relacionados ou não com as actividades antrópicas. A terceira ferramenta, os perímetros de protecção das captações, têm como objectivo delimitar uma área em redor das captações na qual são restringidas parcial ou totalmente certos tipos de actividades poluentes.

Todas estas ferramentas têm as suas limitações e dificuldades de aplicação. No entanto, estes métodos são complementares e o seu uso em conjunto torna-os uma ferramenta versátil, poderosa e imprescindível para os especialistas e responsáveis pela gestão dos recursos hídricos.

4.2 - Mapas de Vulnerabilidade

Os mapas de vulnerabilidade à poluição são geralmente elaborados a partir do cruzamento de vários níveis de informação (parâmetros geológicos e hidrogeológicos, ocupação do solo, etc.) aos quais podem ser atribuídos factores de ponderação em função da sua importância na contribuição para a vulnerabilidade do aquífero. As ferramentas informáticas, nomeadamente as de análise espacial em formato *raster*, são fundamentais nestes cálculos, essencialmente pela facilidade e rapidez de execução que permitem.

A primeira etapa consiste na discretização de cada parâmetro numa malha de resolução predefinida (Figura 5). A segunda etapa consiste na sobreposição dos vários níveis de informação (Figura 6). Para cada célula da malha é calculado a soma ponderada dos vários parâmetros, obtendo-se na malha final o respectivo valor do índice.

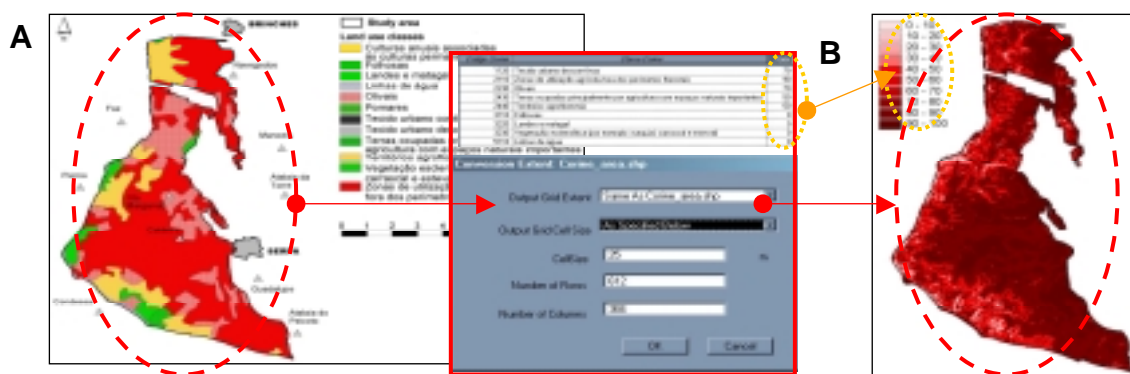


Figura 5 – Discretização da variável uso do solo numa malha de resolução 25 m (B) usando o VALOR da tabela associada aos objectos gráficos poligonais de *input* (A)

Na figura 6 apresenta-se os resultados da determinação do Índice de Susceptibilidade à poluição (IS), completados por uma legenda apropriada, criada a partir de uma ampla variedade de cores em função de intervalos de amplitude de 10%, e um histograma que permite evidenciar as classes mais representativas do mapa. Neste exemplo, correspondem ao intervalo 60-70, que significa uma susceptibilidade à poluição intermédia a alta.

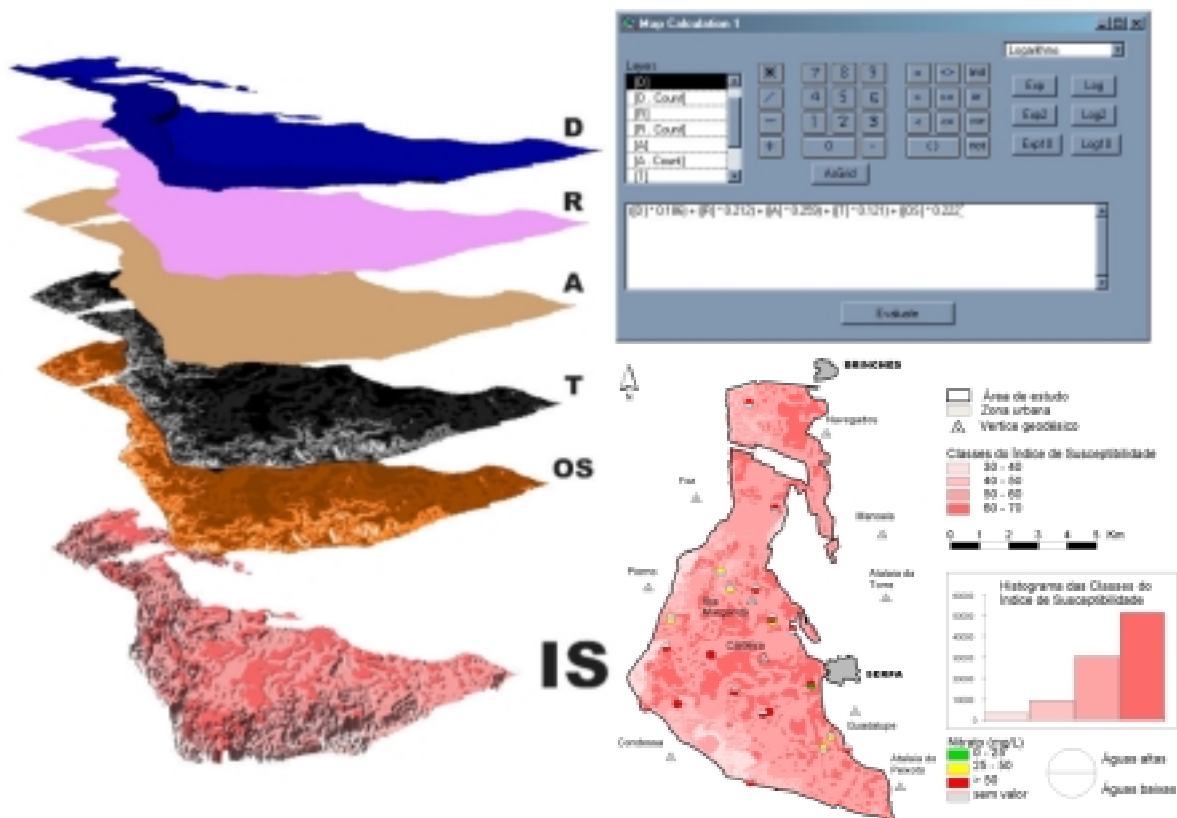


Figura 6 – Cálculo do IS a partir da soma ponderada de 5 níveis de informação

A descrição dos fundamentos e metodologia para determinação do Índice de Susceptibilidade à poluição estão referidos em Francés *et al* (2001).

Na elaboração do parâmetro D (profundidade do nível da água subterrânea) foram utilizadas várias técnicas geostatísticas com base em aplicações informáticas. Numa primeira determinaram-se os parâmetros estruturais do variograma com base no *software* Variowin 2.2 (PANNATIER, 1995) de acordo com a seguinte fórmula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

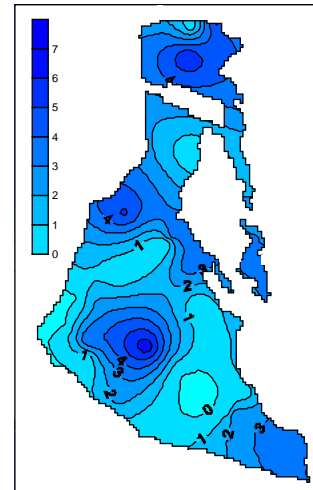
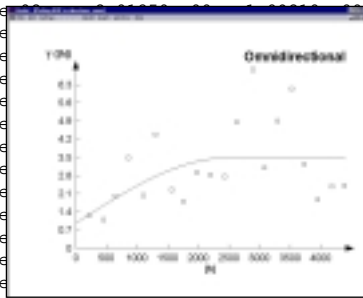
em que:

$N(h)$ – número de pares experimentais $[Z(x_i), Z(x_i+h)]$

h – distância entre cada conjunto de pares experimentais

Os resultados estão representados na figura 7A.

```
VARIOGRAPHY
Variable: NHE
Direction: 0      Angular tolerance: 90      Maximum BW: NA
Data variance: 3.42373e+00      Code for missing values: -9999
Lag  NPairs Mean |h|      Variogram      Std. Variogram      Covariance
1    6      2.19138e+02      1.24333e+00      1.50000e+00      -4.14444e-01
2    10     4.54903e+02      1.09900e+00      3.68433e-01      1.88390e+00
3    20     6.47063e+02      1.09900e+00      3.68433e-01      -1.70225e-01
4    38     8.60733e+02      1.09900e+00      3.68433e-01      -1.33331e-01
5    32     1.10870e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      -1.68789e-01
6    48     1.30297e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      -7.37435e-01
7    32     1.56617e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      1.88257e+00
8    40     1.76088e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      7.91900e-01
9    56     1.97881e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      7.62895e-01
10   60     2.20295e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      -2.46111e-02
11   68     2.43057e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      -1.61929e-01
12   54     2.63061e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      -3.89849e-01
13   42     2.89102e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      -1.02322e+00
14   72     3.08246e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      -2.60295e-01
15   50     3.29653e+03      1.09900e+00      3.68433e-01      -1.41498e+00
16   46     3.52652e+03      6.13783e+00      1.24429e+00      -1.20503e+00
17   76     3.73574e+03      3.23421e+00      1.05918e+00      -1.80693e-01
--   --
```



A

B

Figura 7 – A: Ficheiro do variograma da profundidade do nível freático (software Variowin 2.2); B: Mapa de profundidade do nível freático em Setembro de 1998 estimado por Krigagem a partir de Surfer®

A interpolação da superfície piezométrica realizou-se a partir de medições pontuais dos níveis com recurso a Krigagem utilizando o estimador definido em (2) disponível no *software* Surfer®. O mapa de profundidade do nível freático pode ser visualizado na figura 7B e a superfície piezométrica na figura 8.

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n (\lambda_i Z(x_i)) \quad (2)$$

em que:

$Z^*(x)$ – valor estimado

$Z(x_i)$ – valor experimental

λ_i – ponderadores atribuídos a cada amostra, cuja soma é igual a 1

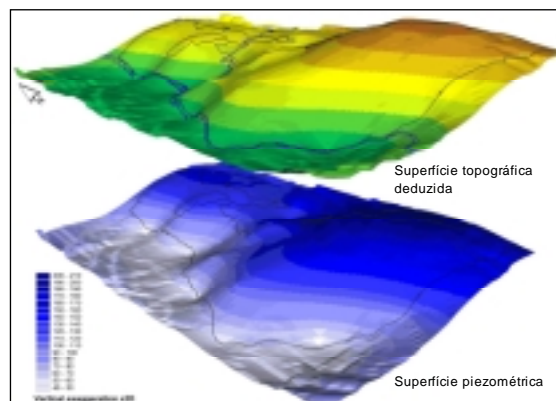


Figura 8 – Superfície piezométrica e topográfica estimadas por krigagem

4.3 - Modelação estocástica da contaminação agrícola

A incerteza do valor de uma variável e da sua distribuição espacial pode ser modelada através de uma abordagem não paramétrica designada por Geoestatística da Indicatriz, particularmente ajustada aos problemas de poluição em que é normal a ocorrência de valores anómalos (RIBEIRO, 1998).

Na análise da evolução da qualidade da água relativamente ao teor em nitratos aplicaram-se um conjunto de técnicas estocásticas com o objectivo de conhecer o padrão de intercorrelação espacial do contaminante e finalmente elaborar mapas de risco ou de isoprobabilidades.

Esta abordagem, baseada no formalismo da indicatriz, traduz-se na codificação binária (0 ou 1), em menores ou iguais e maiores que um determinado valor de corte. Considerando que $I_z(x)$ é a variável indicatriz de $Z(x)$ com base no corte z , tem-se (SOARES, 1996):

$$I_z(x_0) = \text{prob} \{ Z(x_0) > z \} \quad (3)$$

em que:

$I_z(x_0)$ – variável indicatriz

$Z(x_0)$ – variável experimental

prob – probabilidade

Z – valor de corte (mg/L)

Em qualquer ponto x_0 do Domínio, a variável $I_z(x_0)$ pode ser interpretada como a probabilidade do valor de $Z(x_0)$ ser superior a z . O valor $I_z(x_0)$ pode ser estimado por krigagem normal através da combinação linear dos valores de $I_z(x_\alpha)$ das amostras vizinhas de x_0 :

No presente trabalho admitiu-se como valor limite o teor de 50 mg NO₃/L equivalente ao Valor Máximo Admissível (VMA) na água de consumo humano (Dec. Lei 236/98).

O resultado final da simulação por krigagem é um mapa de isoprobabilidade de ocorrência de valores de nitratos superior ao limite seleccionado.

Uma análise mais detalhada da evolução espaço-temporal da contaminação agrícola no Sistema Aquífero dos “Gabros de Beja”, na área de Beja, está descrita em Paralta e Ribeiro (2000).

A título de exemplo apresenta-se uma caracterização geoestatística do fenómeno de poluição por nitratos na região de Serpa (PARALTA e FRANCÉS, 2000).

Numa primeira fase são determinados os estatísticos básicos do conjunto amostral, relativo a medições efectuadas em Setembro de 1998 (Quadro 2) e, posteriormente, determinam-se os modelos estruturais da variável indicatriz correspondente ao VMA do ião nitrato (50 mg/L). Os variogramas experimentais omnidireccionais foram ajustados a modelos teóricos esféricos de variância 0,2, termo pepítico 0,12 e amplitude de 700 m e a estimação por krigagem foi realizada sobre uma malha de 200x200 m.

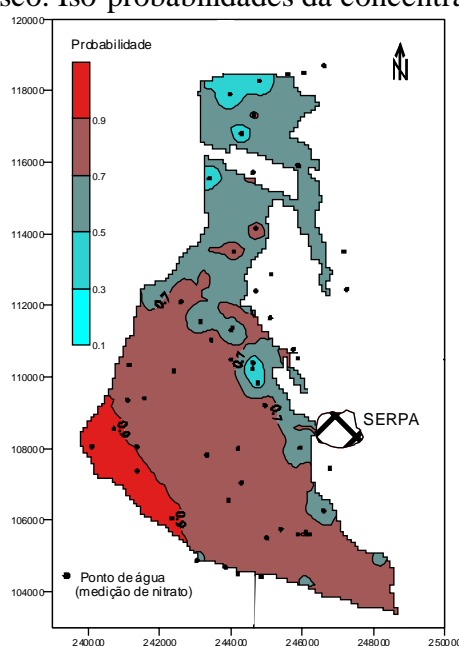
Quadro 2

Estatísticos dos teores em nitratos medidos em Setembro de 1998 (mg/L)

| Mínimo | 1º Quartil | Mediana | Média | 3º Quartil | Máximo | Desv. Pad. | N |
|--------|------------|---------|-------|------------|--------|------------|----|
| 22,0 | 48,0 | 61,5 | 64,8 | 76,8 | 142 | 23,4 | 56 |

Apresenta-se na figura 9 a carta de risco ou de iso-probabilidades de ocorrência de valores de nitratos superiores a 50 mg/L.

Figura 9 – Mapa de Risco. Iso-probabilidades da concentração em nitrato exceder



50 mg/L em Setembro de 1998

Constata-se que, na maioria da área do aquífero, a probabilidade de ocorrência de águas sem qualidade para consumo público é superior a 70%.

4.4 - Perímetros de protecção das captações públicas

No sentido de garantir a preservação da qualidade da água subterrânea para consumo humano, o Governo português legislou em 22 de Setembro de 1999 no sentido de serem definidos *Perímetros de Protecção para Captações de Águas Subterrâneas Destinadas ao Abastecimento Público* (Decreto-Lei nº 382/99). São abrangidas por este diploma todas as captações de água subterrânea destinadas ao abastecimento público de água para consumo humano de aglomerados populacionais com mais de 500 habitantes ou cujo caudal de exploração seja superior a 100 m³/dia.

O presente diploma define 3 áreas de protecção contíguas às captações:

1. Zona de Protecção Imediata - área do terreno contígua à captação em que todas as actividades são, por princípio, interditas;
2. Zona de Protecção Intermédia- área de terreno contígua à anterior, de extensão variável, definida em função das condições geológicas e estruturais do aquífero de forma a eliminar ou reduzir a contaminação da água subterrânea;
3. Zona de Protecção Alargada- área do terreno, contígua à Zona de Protecção Intermédia, destinada a proteger a água subterrânea de poluentes persistentes.

A delimitação dos perímetros de protecção são estabelecidos em função das características do aquífero, das condições da captação e dos caudais de exploração, mediante a realização de estudos hidrogeológicos efectuados por técnicos especializados em águas subterrâneas.

Dos vários métodos conhecidos aplicou-se a metodologia de Jacobs e Bear que utiliza a equação (4) para determinar o tempo de trânsito (T_R) de um poluente, que é depois convertido em raio maior (direcção oposta ao sentido do fluxo) e raio menor (direcção perpendicular ao fluxo hídrico) com auxílio de um Ábaco de curvas isócronas semelhantes a parábolas (MERINO e NAVARRETE, 1991):

$$Tr = \frac{2.T^2.i^2}{m_e.Q.b}.t \quad (4)$$

em que:

T - Transmissividade (m^2/d)

Q - Caudal (m^3/h)

t - tempo (isócrona que se pretende calcular, em horas)

b - espessura saturada (m)

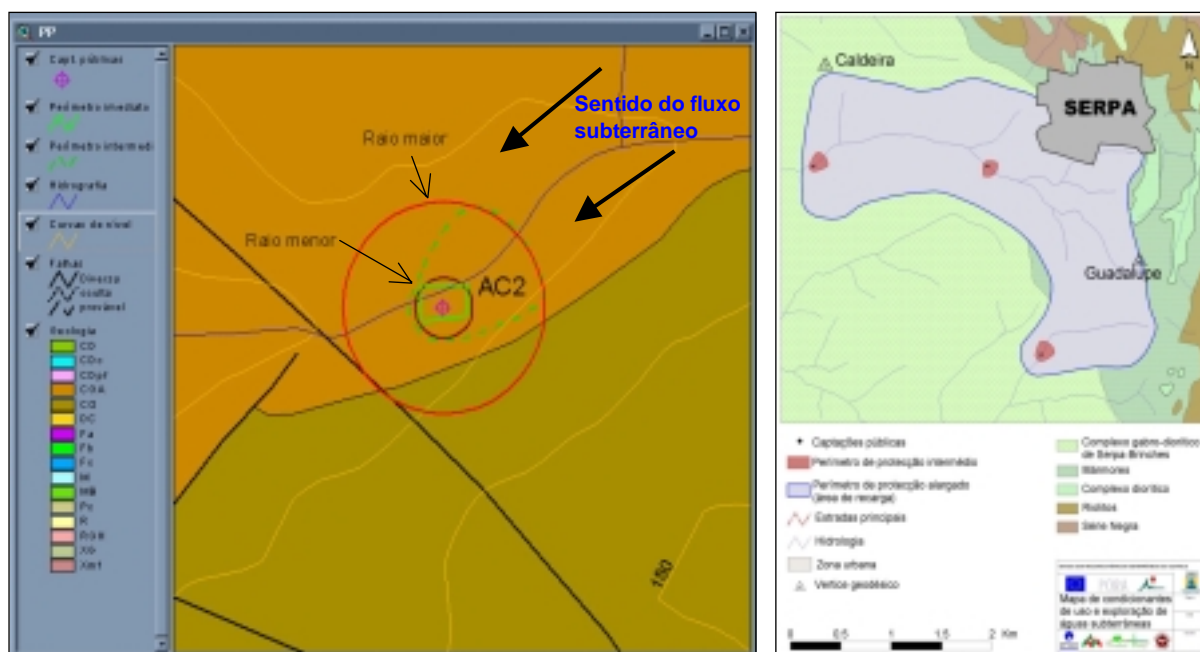
i - gradiente hidráulico (adimensional)

m_e - porosidade eficaz (adimensional)

Foram calculados os raios para determinar o perímetro intermédio com t igual a 50 dias. A partir destes resultados são criados em SIG dois *buffers* (um com o raio menor e outro com o raio maior) em redor das captações e, em função do sentido do fluxo, da geologia e do gradiente hidráulico é desenhado o perímetro mais adequado (figura 10A).

O perímetro alargado corresponde neste caso à área de recarga da sub-bacia hidrográfica na qual estão implantadas as captações como se representa na figura 10B.

Os SIG permitem assim ao geólogo ter uma visão integrada dos vários factores locais que podem interferir na qualidade das águas subterrâneas numa dada captação.



A

B

Figura 10 – A. Delimitação dos perímetros imediato e intermédio em ambiente SIG;
B. Delimitação do perímetro de protecção alargado

5 - CONCLUSÕES

As ferramentas informáticas permitem realizar estudos integrados dos geosistemas, pelo que a sua utilidade em hidrogeologia é evidente, dado que se trata do estudo de um recurso natural renovável, indispensável ao desenvolvimento social e económico das populações.

Os sistemas de informação permitem não só a organização e o armazenamento dos vários parâmetros e componentes do ciclo da água como permitem realizar análises multiparamétricas. A figura 11 mostra a organização deste sistema e a ligação entre as várias componentes de estudo, análise, gestão e de consulta da informação.

Os trabalhos desenvolvidos na área de Serpa permitiram caracterizar a situação actual dos recursos hídricos subterrâneos do complexo gabro-diorítico de Serpa-Brinches, em termos de qualidade e quantidade.

Os resultados obtidos indicam uma situação de contaminação persistente por nitratos de origem agrícola que importa inverter com a adopção de novos códigos de conduta e sensibilização ambiental dos intervenientes e dos poderes públicos. Esta situação está sempre presente qualquer que seja a origem de água considerada, quer de abastecimento público quer privado, constituindo um problema agro-ambiental herdado de décadas de práticas agrícolas intensivas.

- HIRATA, R. e REBOUÇAS, A. (1999) - *La proteccion de los recursos hídricos subterráneos: Una vision integrada, baseada en perímetros de proteccion de pozos y vulnerabilidade de acuíferos*. Boletín Geológico y Minero, nº4, 1999, pp. 79-92.
- MERINO, L. M. e NAVARRETE C. M. (1991) – *Guia Metodológica para la Elaboración de Perímetros de Protección de Captaciones de Aguas Subterráneas*. ITGE, 1991, pp. 111-113.
- PANNATIER, Y. (1995) - *Software Variowin 2.2*. Lausanne (Switzerland), Institute of Mineralogy, University of Lausanne, 1995.
- PARALTA, E. (2000) - *Ficha de Aquífero do Sistema Aquífero dos Gabros de Beja (Região de Serpa)*. Relatório do Projecto ERHSA, Lisboa, IGM, 2000, 102 pp.
- PARALTA, E. e RIBEIRO, L. (2000) - *Análise variográfica e cartografia de risco da contaminação por nitratos na região de Beja*. Rev. da Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, APRH, vol. 21, nº3, 2000, pp. 47-58.
- PARALTA, E. e FRANCÉS, A. (2000) – *Caracterização hidrogeológica e avaliação da vulnerabilidade à poluição do complexo gabro-diorítico de Serpa-Brinches*. Geonovas nº14, 2000, pp. 27-35.
- RIBEIRO, L. (1998) - *Probabilidades e Probabilidades Condicionais em Hidrogeologia* in 4º Congresso da Água, Lisboa, APRH10 pp.
- SOARES, A. (1996) - *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*. Lisboa, IST Press, 2000, 206 pp.