

CARTOGRAFIA AUTOMÁTICA DA VULNERABILIDADE DE AQUÍFEROS COM BASE NA APLICAÇÃO DO MÉTODO DRASTIC

Manuel M. OLIVEIRA¹; J.P.C. LOBO-FERREIRA²

RESUMO

Este artigo baseia-se nos resultados de um Protocolo de Cooperação estabelecido entre o INAG e o LNEC, com o título "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com base na Aplicação do Método DRASTIC". Dado o interesse que tem a elaboração de mapas de vulnerabilidade de águas subterrâneas à poluição para a gestão do território, procurou-se no âmbito desse Protocolo desenvolver um conjunto de processos automáticos que permita obter os referidos mapas de vulnerabilidade.

Para o mapeamento automático da vulnerabilidade DRASTIC desenvolveu-se um conjunto de 26 aplicações em *Arc Macro Language* (AML) que, utilizando o sistema de informação geográfica ARC/INFO[®], permite fazer a atribuição automática dos índices.

Para cada parâmetro do índice DRASTIC, as aplicações desenvolvidas permitem quatro opções básicas: (1) construir a carta utilizando procedimentos automáticos (ou, nalguns casos, semi-automáticos); (2) importar a carta já realizada; (3) visualizar a carta; (4) escrever um mapa em formato *Postscript*. São descritos os processos programados para a atribuição automática ou semi-automática dos índices (opção 1).

O conceito subjacente a toda a aplicação do método DRASTIC é o de unidade cartografada. A unidade cartografada pode ser o aquífero, o sistema aquífero, a formação geológica, etc. As bases de informação são o ponto de partida essencial para a utilização de processos automáticos. Para a cartografia automática da vulnerabilidade utilizam-se bases de cartografia e bases de dados.

Apresentam-se os mapas resultantes da aplicação desta metodologia às formações geológicas aflorantes da região de Faro e ao sistema aquífero livre da Campina de Faro.

Palavras-chave: águas subterrâneas, vulnerabilidade, DRASTIC, mapeamento, Faro, cartografia.

¹ Licenciado e Mestre em Geologia Económica e Aplicada, Assistente de Investigação do Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas do Departamento de Hidráulica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1799 Lisboa Codex.

² Licenciado e Doutorado em Engenharia Civil, Investigador Principal e Chefe do Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas do Departamento de Hidráulica do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1799 Lisboa Codex.

1 - INTRODUÇÃO

Este artigo baseia-se nos resultados de um Protocolo de Cooperação estabelecido entre o INAG e o LNEC, com o título "Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com base na Aplicação do Método DRASTIC". Dado o interesse que tem a elaboração de mapas de vulnerabilidade de águas subterrâneas à poluição para a gestão do território, procurou-se no âmbito desse Protocolo desenvolver um conjunto de processos automáticos que permita obter os referidos mapas de vulnerabilidade. O texto apresentado é extraído essencialmente do trabalho de OLIVEIRA *et al.* (1997).

2 - O CONCEITO DE VULNERABILIDADE E O MÉTODO DE VULNERABILIDADE DRASTIC

O conceito de vulnerabilidade e o método DRASTIC têm sido apresentados várias vezes pelos autores deste artigo em comunicações a anteriores Congressos da Água (OLIVEIRA e LOBO-FERREIRA, 1994; OLIVEIRA *et al.*, 1996) pelo que aqui apenas se apresentam os conceitos principais.

A vulnerabilidade à poluição de águas subterrâneas pode definir-se como *a sensibilidade da qualidade das águas subterrâneas a uma carga poluente, função apenas das características intrínsecas do aquífero*. Este conceito, proveniente das conclusões da conferência internacional sobre "Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants" (DUIJVENBOODEN e WAEGENINGH (Ed.), 1987), fora já apresentado nas referidas comunicações e foi recentemente incluído no glossário do "Guia para a Elaboração dos Planos de Bacia".

O índice DRASTIC corresponde ao somatório ponderado de sete valores correspondentes aos seguintes sete parâmetros ou indicadores hidrogeológicos (cf. ALLER *et al.*, 1987):

- D** - Profundidade do Topo do Aquífero
- R** - Recarga do Aquífero
- A** - Material do Aquífero
- S** - Tipo de Solo
- T** - Topografia
- I** - Influência da Zona Vadosa
- C** - Condutividade Hidráulica do Aquífero

Cada um dos sete parâmetros DRASTIC foi dividido quer em escalas quer em tipos de meios significativos que condicionam o potencial de poluição. A cada uma das divisões atribuiu-se um índice que varia entre 1 e 10 e cujo valor se relaciona directamente com o potencial de poluição. O índice de vulnerabilidade DRASTIC obtém-se multiplicando o índice de cada parâmetro por um peso que reflecte a importância relativa desse parâmetro. Há dois conjuntos de pesos: um para a vulnerabilidade geral e outro para a vulnerabilidade específica a pesticidas.

3 - METODOLOGIA SUBJACENTE À CARTOGRAFIA AUTOMÁTICA DA VULNERABILIDADE

Para o mapeamento automático da vulnerabilidade **DRASTIC** desenvolveu-se um conjunto de aplicações em *Arc Macro Language* (AML) que, utilizando o sistema de informação geográfica ARC/INFO[®], permite fazer a atribuição automática dos índices. No texto que se segue utiliza-se alguma terminologia própria de ARC/INFO[®], que se procura aqui definir sucintamente: *cobertura* (conjunto de dados espaciais que caracterizam um tema; o

tema é um nível de informação, por exemplo geologia, solos, etc.); *polígono* (uma área do mapa delimitada dentro da qual o tema representado tem o mesmo valor; o conjunto dos polígonos forma uma cobertura de polígonos); *topologia* (de uma cobertura de polígonos - identificação individual de cada polígono, contendo a área, o perímetro e o valor assumido pelo tema representado na cobertura); *tabela de atributos de polígonos* (tabela que relaciona os polígonos da cobertura de polígonos com a respectiva topologia); *tabela de relacionamento* (de uma cobertura de polígonos - tabela que relaciona os valores assumidos pelos polígonos de uma cobertura com outros atributos que caracterizam esse polígono).

Para a utilização de processos automáticos ou semi-automáticos de elaboração da carta correspondente a cada parâmetro DRASTIC pressupõe-se a existência da seguinte informação:

- coberturas de base com a topologia atribuída;
- bases de dados contendo informação sobre pontos de água;
- tabelas de relacionamento entre a topologia dos polígonos e o índice a atribuir ou que permitam o cálculo do índice do parâmetro em análise.

Para cada parâmetro do índice DRASTIC, as aplicações desenvolvidas permitem quatro opções básicas:

1. construir a carta utilizando procedimentos automáticos (ou, nalguns casos, semi-automáticos): o utilizador introduz o nome da(s) cobertura(s) de base e o programa vai utilizar as tabelas de relacionamento e as bases de dados necessárias ao conjunto de procedimentos que permitem calcular o parâmetro;

2. importar a carta já realizada: permite incluir uma cobertura já preparada previamente, à qual está associada uma tabela de atributos de polígonos contendo o índice do parâmetro em questão;

3. visualizar a carta: permite observar a carta construída para o parâmetro em questão;

4. produzir um mapa: permite escrever um ficheiro contendo o mapa em formato *Postscript*. Esta opção está preparada para produzir mapas a cores ou a preto e branco para escalas entre 1:50 000 e 1:90 000.

O conceito subjacente a toda a aplicação do método DRASTIC é o de unidade cartografada. A unidade cartografada pode ser o aquífero, o sistema aquífero, a formação geológica, etc.

Para cada unidade cartografada deve ser feita uma cobertura. Note-se que uma unidade cartografada pode sobrepor-se a outra unidade cartografada. Cada cobertura pode ter mais do que um polígono. Cada polígono deverá conter a informação se se trata de um aquífero livre (tipo 0), confinado (tipo 1), ou se é livre mas existe um aquífero suspenso por cima ou outra formação geológica (tipo 2).

No caso de se pretender produzir a carta de vulnerabilidade das formações aflorantes, todas as unidades são livres, pelo que o tipo de aquífero neste caso é sempre 0 e não há sobreposição de unidades cartografadas.

Um dos processos semi-automáticos comum à maioria dos índices é o da atribuição do índice a partir da geologia. Esta opção encontra-se disponível para os parâmetros D, R, A, S, I e C.

4 - BASES DE INFORMAÇÃO

As bases de informação são o ponto de partida essencial para a utilização de processos automáticos. Para a cartografia automática da vulnerabilidade utilizam-se bases de cartografia e bases de dados.

As bases de cartografia contêm a informação espacial. Como bases de cartografia utilizam-se a Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000, a Carta de Sistemas Aquíferos de

Portugal (em desenvolvimento), a Carta de Solos de Portugal à escala 1:50 000 e a Carta de Uso de Solo (*Corine Land Cover*) à escala 1:100 000.

A codificação das legendas destas cartas é essencial.

Para a Carta Geológica de Portugal fez-se a codificação a partir da classificação das formações geológicas e da sua posição na coluna geocronológica. Dado que à escala utilizada não há uma legenda uniforme para todo o País, optou-se por se fazer a codificação de cada legenda de cada carta geológica. O código obedece à seguinte estrutura: CCC TTTT FF, onde CCC se refere ao número da folha 1:50 000, TTTT à geocronologia e FF à formação. Na componente CCC os primeiros dois dígitos referem-se ao número da folha 1:100 000 e o terceiro dígito refere-se à carta 1:50 000, sendo A, B, C e D substituídos por 1, 2, 3 e 4, respectivamente. A componente TTTT é determinada a partir da codificação da escala geocronológica (apresentada em OLIVEIRA *et al*, 1997). A componente FF refere-se à posição de uma determinada formação dentro de um mesmo tempo da tabela geocronológica.

A codificação da legenda da Carta de Solos de Portugal obedece à classificação apresentada por SROA (1970, 1973). Ao contrário da classificação geológica, esta é uniforme para toda a área cartografada pelo que é independente da folha 1:50 000. Daí que haja uma classificação com apenas seis dígitos: O So G Sg F F, onde O é a ordem, So a subordem, G o grupo, Sg o subgrupo, e F F faz a distinção entre famílias de um mesmo grupo.

A legenda da Carta de Uso de Solo já está originalmente codificada pelo que se usa a mesma codificação (com três ou quatro dígitos).

Dado que a cartografia dos sistemas aquíferos de Portugal se encontra actualmente em desenvolvimento optou-se por não se estabelecer regras para a codificação da sua legenda, criando-se apenas códigos utilizáveis para os exemplos de aplicação.

Considera-se ainda uma base de cartografia com a informação pontual da precipitação anual média ocorrida em Portugal Continental para o período 1951-1980.

A interpretação da informação espacial faz-se utilizando tabelas de relacionamento (ver secção 5.) entre os códigos das legendas das bases de cartografia e informação que permite a atribuição dos índices dos parâmetros DRASTIC. São cinco as tabelas de relacionamento desenvolvidas.

As tabelas de relacionamento juntamente com as bases de dados de pontos de água subterrânea (SNIRH e Inventar (LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1993)) constituem as bases de dados necessárias para a elaboração da cartografia automática da vulnerabilidade.

5 - CARACTERIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DRASTIC EM ARC/INFO®

5.1 Caracterização do Parâmetro D

Para a elaboração desta carta são dadas duas opções:

- (1) atribuição do índice mediante a consulta de bases de dados;
- (2) atribuição do índice a partir da geologia.

Os mapas são criados tendo como base de partida a unidade cartografada.

5.1.1 Atribuição do índice mediante a consulta de bases de dados

Se se utilizar a primeira opção, se a unidade cartografada for um sistema aquífero e a cobertura possuir mais que um polígono, são criadas tantas coberturas quantos os polígonos existentes no sistema aquífero em análise. Estes polígonos estão relacionados com a indicação espacial se o aquífero é livre (tipo 0), confinado (tipo 1), ou se é livre mas existe um aquífero suspenso por cima ou outra formação geológica (tipo 2). Para cada polígono considera-se que há uma variação linear de profundidade ao topo do aquífero entre dois pontos cujo valor é

conhecido. Se a unidade cartografada são as formações aflorantes, o procedimento de cálculo é o mesmo, só que à partida existe apenas uma cobertura que ocupa todo o espaço em análise, sendo toda a área tratada como um único aquífero livre. De igual modo, pode haver mais que uma cobertura quando se está a considerar uma área onde o contorno não seja contínuo (existência de ilhas rodeadas por mar ou reentrâncias de mar que para uma área em estudo individualize áreas fechadas).

O procedimento automático consiste em utilizar informação armazenada em bases de dados sobre águas subterrâneas (por exemplo Inventar (LOBO-FERREIRA e OLIVEIRA, 1993) ou Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos, do INAG). São consultadas quatro tabelas que fornecem informação importante relativamente a este parâmetro:

- tabela **AQUIFERO** com a indicação do sistema aquífero (**SIST_AQ**) e das profundidades do topo (**PROF_TOPO**) e da base (**PROF_BASE**) do sistema aquífero a que pertencem os pontos de água;
- tabela **LOCCOMP** com as coordenadas M (**COORD_M**) e P (**COORD_P**) de localização do ponto de água e com o código do tipo de ponto de água (**TIPO_PA**);
- tabela **NIVEIS** com a profundidade dos níveis medidos nos pontos de água (**PROFUND**);
- tabela **ZONACAP** com a informação sobre as profundidades da base da zona captada (**BASE_CAPT**) por cada ponto de água.

As diferentes tabelas encontram-se ligadas por dois campos, um com o número da carta militar à escala 1:25000 onde se insere o ponto de água (**NCARTA**) e outro com o número de ordem do ponto de água dentro dessa carta (**NREGISTO**).

No caso de se pretender mapear a vulnerabilidade à poluição das águas subterrâneas de um determinado sistema aquífero, o procedimento consiste no seguinte:

(1) verificar se o ponto de água está a medir o aquífero para o qual se pretende determinar a vulnerabilidade, recorrendo à coluna **SIST_AQ** da tabela **AQUIFERO**.

O conjunto de procedimentos seguinte ocorre quando a condição (1) é válida.

(2) verificar se o aquífero é livre ou se é confinado recorrendo à tabela **AQUIFERO**: se o valor de **PROF_TOPO** for **0** trata-se de aquífero livre; se o valor de **PROF_TOPO** for diferente de **0** trata-se de aquífero confinado.

(3) ler as coordenadas de localização do ponto de água na tabela **LOCCOMP**.

(4) no caso de aquífero confinado, utilizar o valor da coluna **PROF_TOPO** da tabela **AQUIFERO** para determinar a profundidade do topo do aquífero.

(5) no caso de aquífero livre, verificar se a zona medida pelo ponto de água se situa exclusivamente no aquífero livre utilizando as tabelas **AQUIFERO** e **ZONACAP**. Na tabela **LOCCOMP** verifica qual o tipo de ponto de água presente (coluna **TIPO_PA**). No caso de ser um poço cuja profundidade da base é desconhecida assume que está a medir o aquífero livre. As nascentes são um caso especial de aquífero livre onde a profundidade do topo do aquífero é zero. A verificação é então feita para os restantes tipos de ponto de água comparando o valor da coluna **BASE_CAPT** da tabela **ZONACAP** com o valor da coluna **PROF_BASE** da tabela **AQUIFERO**. No caso de **BASE_CAPT** não ser superior à **PROF_BASE** então a zona medida está exclusivamente no aquífero livre e este ponto de água será utilizado para a determinação do parâmetro em análise. É então consultada a coluna **PROFUND** da tabela **NIVEIS**, podendo o utilizador escolher se deseja para a caracterização da profundidade do topo do aquífero utilizar a profundidade mínima, a média ou a máxima das profundidades medidas no ponto de água em análise.

No caso de se pretender produzir a carta de vulnerabilidade das formações aflorantes, todos as unidades são livres, e serão utilizados todos os níveis medidos em pontos de água que

estejam a medir o aquífero livre, utilizando-se o método de interpolação indiferentemente das formações aflorantes para toda a área em estudo (ou seja, não é criada uma cobertura para cada sistema aquífero).

O resultado é a gravação de um ficheiro com informação pontual em quatro colunas com o número do ponto de água, a coordenada M, a coordenada P e a profundidade do topo do aquífero.

A informação da base de dados é pontual e é necessário interpolar essa informação para toda a área em análise. Este procedimento tem várias etapas:

(1) transformação deste ficheiro numa cobertura de pontos em que cada ponto contém a informação da profundidade do tecto do aquífero;

(2) criação de uma malha com espaçamento entre nós de 25 m;

(3) transformação da malha numa cobertura de polígonos cujos limites contêm os dados pertencentes a uma classe do intervalo do parâmetro D.

No caso de haver um só elemento para o sistema aquífero em análise, considera-se o índice D constante para todo o sistema aquífero, sendo o índice dado em função do valor de profundidade do topo do aquífero desse elemento. No caso de não haver informação, esta área passa a ser considerada área sem elementos.

5.1.2. Atribuição do índice a partir da geologia

No caso de aquífero livre, pode acontecer que na região em análise se possa estabelecer alguma relação entre a geologia e o índice do parâmetro D. Esta situação é particularmente possível no caso de aluviões onde a profundidade ao nível freático é normalmente pequena. Também no caso de formações de areias de praia existentes em cordões litorais ou pequenas ilhas de rio ou mar, o nível deverá estar próximo da superfície.

5.2 Caracterização do Parâmetro R

Não há uma metodologia consagrada para o cálculo da recarga de um aquífero livre, pelo que em muitos casos dever-se-á construir esta carta separadamente e importá-la para o cálculo do índice DRASTIC. No entanto, possibilita-se a utilização de dois métodos apresentados em OLIVEIRA *et al.* (1997) que permitem, a partir de informação de base, estimar e extrapolar a recarga para outras regiões. Esses dois métodos são:

(1) método de VERMEULEN *et al.* (1993, 1994); nos casos em que se está perante formações porosas, em que se pode considerar que a água disponível abaixo da camada de solo pode ser incorporada pelo aquífero;

(2) utilizando a recta de correlação da recarga (**R**) sobre a precipitação (**P**), determinada para casos estudados de formações xistosas e graníticas do Maciço Antigo Português. Esta recta, apresentada em OLIVEIRA *et al.* (1997, 1997a) tem a expressão: $R = 0,551 \times P - 323$ (mm/ano), considerando-se recarga nula quando **P** é inferior a 586 mm/ano.

Para além destes dois métodos há ainda a possibilidade de atribuir o índice a partir da geologia. Esta opção surge porque a recarga depende das propriedades hidráulicas das formações geológicas, sendo frequente os trabalhos sobre hidrogeologia referirem a recarga em função das formações geológicas.

Comum aos dois métodos de estimação da recarga está a necessidade de se utilizar dados de precipitação. Foi criada a cobertura de pontos **PRPORTPNT**, contendo as precipitações anuais médias calculadas a partir dos registos de precipitação ocorrida no período de 1951 a 1980 em 352 estações climatológicas e udométricas de Portugal Continental

(valores publicados em INMG, 1991) complementadas com mais dez valores, perfazendo um total de 362 registos.

Para o cálculo utilizando o método de VERMEULEN *et al.* (1993, 1994) são necessárias as seguintes coberturas de base: cobertura de polígonos do Land-Cover Corine (mapa de uso de solo); cobertura de polígonos do mapa de solos; e cobertura de pontos da precipitação **PRPORTPNT**.

A cobertura da recarga obtém-se mediante os seguintes passos:

(1) união das coberturas de polígonos Land-Cover Corine e Mapa de Solos para a área em estudo. Na cobertura de união existe, entre outros, um item relacionado com o código de uso de solo e um item relacionado com o código de solo;

(2) cálculo da precipitação média em cada polígono resultante do processo (1), utilizando a cobertura de pontos **PRPORTPNT**;

(3) corrida de um programa que a partir do código do uso de solo e do código de solo caracteriza um conjunto de variáveis que permitem a estimativa da recarga.

Para o cálculo da recarga utilizando o método da recta de correlação sobre a precipitação, a única informação de base necessária é a cobertura de pontos da precipitação **PRPORTPNT**. Este procedimento consiste em:

(1) calcular a malha de precipitação da área em estudo a partir da cobertura de pontos **PRPORTPNT**;

(2) aplicar a equação de correlação à malha que contém a precipitação na área em estudo e transformar esta malha numa cobertura de polígonos com os intervalos de classes do parâmetro R.

No caso de aquífero confinado, a recarga é normalmente muito baixa pelo que é atribuído automaticamente o índice 1.

5.3 Caracterização dos Parâmetros A, I e C

Para a atribuição automática dos parâmetros A, I e C existem duas vias que estão relacionadas com a cartografia de vulnerabilidade que se pretende fazer:

- (1) vulnerabilidade das formações geológicas aflorantes;
- (2) vulnerabilidade de um sistema aquífero.

A cobertura de base é, para o caso das formações geológicas aflorantes, a carta geológica de Portugal, editada e publicada pelo Instituto Geológico e Mineiro, à escala 1:50 000. A topologia desta cobertura é o código geológico que se relaciona com a legenda da carta da forma apresentada na secção 4. Para o exemplo apresentado da metodologia para a cartografia automática da vulnerabilidade à poluição (ver secção 7.) fez-se a atribuição dos índices A, I e C em função da geologia. Estes índices são armazenados na tabela de relacionamento **GEOLOG.EXPAND** (Quadro 1), que faz corresponder a cada formação geológica cartografada um índice.

Para o caso da vulnerabilidade de um sistema aquífero, a cobertura de base é o contorno do sistema aquífero. A atribuição do código do item relativo a este índice é feita utilizando a tabela de relacionamento **SISTAQ.EXPAND** (Quadro 2). Esta tabela faz corresponder ao sistema aquífero em análise um único valor que caracteriza em termos médios os parâmetros A, I e C desse sistema aquífero.

Para o parâmetro I, aos polígonos relativos a aquífero confinado (tipo 1), é atribuído automaticamente o índice 1, de acordo com ALLER *et al.* (1987).

No caso de se estar perante um único sistema aquífero mas onde haja variação lateral de algum dos parâmetros, o procedimento consiste em fazer a cartografia dos parâmetros desse

sistema aquífero, atribuir directa e manualmente os índices A, I e C, e importar a carta construída dessa forma.

Para os casos em que é possível utilizar um procedimento automático, os programas relativos a cada um dos parâmetros criam o item relativo ao índice em questão e vão preenchê-lo a partir das tabelas de relacionamento. Às zonas sem informação é atribuído o índice 9999.

Apesar destes procedimentos automáticos relacionarem os códigos geológicos com o índice a atribuir, é também dada a possibilidade de atribuição do índice a partir do código geológico.

Quadro 1

Valores da GEOLOG.EXPAND

COD_GEOL	A	I	C	COD_GEOL	A	I	C
531620006	4	4	1	531513003	5	5	1
531620005	6	6	1	531513002	8	8	2
531620004	8	8	4	531513001	4	4	1
531620003	8	8	4	531512001	8	8	2
531620002	8	8	1	531331901	6	6	1
531620001	6	6	1	531331001	6	6	1
531610001	8	8	1				

Quadro 2

Valores da SISTAQ.EXPAND

SISTAQ	A	I	C
1011	7	7	1
1012	8	8	2
102	10	10	10
103	6	6	1

Os valores dos parâmetros A e I são obtidos a partir da informação existente que pode provir de notícias explicativas de cartas geológicas, bibliografia de síntese da geologia portuguesa, trabalhos e dissertações de geologia ou hidrogeologia, colunas litológicas, etc.

Para o caso da vulnerabilidade das formações geológicas aflorantes, os valores apresentados para o parâmetro I são em tudo idênticos aos do Material do Aquífero. Tal deve-se ao facto do material da zona vadosa e do aquífero ser o mesmo (recorde-se que se está a considerar aquíferos livres) e devido ao facto das tabelas de atribuição do índice a estes parâmetros serem muito semelhantes no que respeita aos materiais envolvidos.

O parâmetro C foi caracterizado a partir de valores publicados na literatura sobre o mesmo. Para o caso de estudo da folha 611 da Carta Militar de Portugal (ver secção 7.), atribuiu-se o índice 4 para as formações A e Ad por analogia com outras regiões do País, índice 2 às formações de biocalcarenítos e de calcários miocénicos (a partir de elementos fornecidos por ALMEIDA, 1985 e SILVA, 1988). Para as restantes formações atribuiu-se o índice 1 com base no uso de tabelas que relacionam a litologia com o índice em questão.

5.4 Caracterização do Parâmetro S

Para a atribuição do índice do parâmetro S, considerou-se apenas um método que usa como cobertura de base a Carta de Solos de Portugal publicada à escala 1:50 000 pela Divisão de Solos do Instituto de Estruturas Agrárias e Desenvolvimento Rural. A topologia desta cobertura utiliza o código de solos referido na secção 4. O método consiste em utilizar a tabela de relacionamento S_DRASTIC.EXPAND entre o código de solos e o índice a atribuir (Quadro 3). A esta tabela acrescentaram-se algumas zonas sem solos como sejam os corpos hídricos, salinas e afloramentos de areia. Aos afloramentos de areia atribuiu-se o índice 10, correspondente a solo ausente, e aos restantes o índice -9, correspondente a zonas sem índice atribuído.

Quadro 3
Valores da S_DRASTIC.EXPAND

SOLO	S_DRAS TIC	SOLO	S_DRAS TIC	SOLO	S_DRAS TIC	SOLO	S_DRAS TIC	SOLO	S_DRAS TIC	SOLO	S_DRAS TIC
111001	10	211102	5	311202	3	512109	5	522112	3	810104	3
111002	10	211103	6	311203	4	512110	5	522113	1	810105	3
111003	10	211104	6	311301	10	512201	7	522114	1	810106	3
111004	10	211105	6	321101	3	512301	3	522115	5	810201	9
111005	10	211106	4	321102	5	512302	6	522201	7	810301	7
111006	10	211107	6	321103	3	512303	6	522301	1	810302	7
111007	10	221101	9	321104	6	512304	3	522302	1	810401	3
111008	10	221102	9	321105	6	512305	5	522401	10	810402	1
111009	10	221103	9	321106	3	512306	1	611101	9	821001	3
111010	10	221104	6	321201	3	512307	3	611201	6	822001	4
111011	10	221105	9	321202	7	512308	3	612001	9	910001	2
121101	10	221106	6	411001	7	512309	6	612002	9	910002	2
121201	9	221107	6	412101	7	521101	3	612003	9	101	10
131101	9	221108	9	412201	7	521102	3	621001	9	102	10
131102	5	221109	6	412301	7	521103	4	622001	9	103	10
131103	3	221110	6	421001	7	521104	1	711101	9	104	10
131201	9	221111	6	422101	7	521105	3	711102	9	105	10
131202	5	221112	5	422201	7	521106	3	711103	5	106	10
131203	3	221113	9	422301	7	521201	7	711104	5	107	10
132101	9	221114	9	422302	7	521202	7	711105	3	108	10
132102	5	221115	6	511101	5	521301	1	711106	3	109	10
132103	3	221201	4	511102	7	522101	3	711201	-9	110	10
132201	9	311101	5	511103	7	522102	3	712101	9	111	10
132202	5	311102	6	511201	1	522103	4	712102	9	112	10
132203	3	311103	5	512101	1	522104	10	712103	5	113	10
140101	9	311104	5	512102	3	522105	9	712104	5	200	-9
140102	5	311105	6	512103	6	522106	6	712105	3	300	-9
140103	3	311106	3	512104	3	522107	1	712106	3	401	-9
140201	9	311107	6	512105	5	522108	5	712201	-9	410	-9
140202	5	311108	9	512106	3	522109	3	810101	3	501	10
140203	3	311109	6	512107	3	522110	3	810102	3		
211101	6	311201	7	512108	5	522111	3	810103	3		

A cobertura de base existe fundamentalmente para a região ao sul do rio Tejo pelo que, para as regiões localizadas fora da zona cartografada, terá que se optar por outras fontes de informação e por outros métodos.

Um desses métodos é precisamente a possibilidade de atribuição do índice S a partir da geologia. Nalguns casos é possível estabelecer essa relação pelo facto de o solo se desenvolver a partir do material geológico que lhe fica subjacente pelo que, quando não existe classificação de solos, é dada a possibilidade de se atribuir este índice em função da geologia.

A representação dos solos nas cartas de solos pode ter associações de solos contendo até três solos diferentes e três fases diferentes num mesmo polígono.

O procedimento para atribuição do índice S consiste em percorrer todos os registos da cobertura de solos e verificar a fase. Se a fase for 2 (delgada) ou 5 (pedregosa), o índice DRASTIC a atribuir deverá ser 10. Se a fase for inexistente ou não for nenhuma das referidas, então o programa vai procurar a relação entre o solo presente e o respectivo índice utilizando a tabela de relacionamento S_DRASTIC.EXPAND (Quadro 3).

O índice é calculado atribuindo directamente o índice determinado pelo processo anterior ou fazendo a média dos índices no caso de se estar perante uma associação de solos.

5.5 Caracterização do Parâmetro T

Para a atribuição do índice do parâmetro T programou-se um método automático que transforma a informação relativa à altimetria dos ficheiros em formato IGDS (“*Interactive Graphic Design Software*”) no mapa do parâmetro Topografia. O formato IGDS é o formato digital em que são disponibilizadas as cartas militares do Instituto Cartográfico do Exército.

O programa faz o seguinte conjunto de acções:

- (1) importa o ficheiro em formato IGDS;
- (2) selecciona a informação relativa à altimetria;
- (3) produz uma malha (*grid*) de altimetria;
- (4) calcula o mapa de declives a partir dessa malha, produzindo uma cobertura de polígonos com as classes de declives consideradas no parâmetro T.

6 - PROGRAMAS DESENVOLVIDOS PARA A AUTOMATIZAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO DO ÍNDICE DRASTIC

Foi desenvolvido um conjunto de dez programas em AML para atribuição do índice de vulnerabilidade DRASTIC. Estes programas fazem o cálculo dos índices DRASTIC para a área correspondente a uma Carta Militar de Portugal (escala 1:25 000). Estes dez programas por sua vez chamam outros 16 subprogramas.

Deverá começar por se correr o programa INICIO.AML onde são introduzidos os seguintes dados de entrada: (A) área de trabalho onde se encontram os programas e as tabelas necessários à corrida dos modelos programados; (B) número da Carta Militar 1:25 000 onde se insere a área a analisar; (C) coordenadas M e P dos cantos do rectângulo onde se insere a área em estudo; (D) cobertura contendo os sistemas aquíferos ou a carta geológica; (E) código do sistema aquífero; no caso de código 0, os programas vão calcular a vulnerabilidade das formações aflorantes; (F) cobertura contendo o uso do solo (Land-Cover Corine), opcional; (G) cobertura de solos (Carta de Solos de Portugal), opcional.

Como resultado, o programa produz uma cobertura de contorno resultante da sobreposição da área do sistema aquífero com o rectângulo contendo a área em estudo definido pelas coordenadas M e P.

Para calcular cada um dos índices são então corridos os programas D.AML, R.AML, A.AML, S.AML, T.AML, I.AML, C.AML que utilizam os procedimentos descritos na secção 5. O índice DRASTIC obtém-se pela corrida do programa DRASTIC.AML.

Para terminar deve-se correr o programa FIM.AML que apaga ficheiros temporários criados durante a execução dos restantes programas.

7 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA À REGIÃO DE FARO

7.1 Caracterização geral da área

Geologicamente, esta área caracteriza-se pela ocorrência de formações do Cretácico até à Actualidade (cf. Carta Geológica de Portugal à escala 1:50 000, Folha 53-A: Faro). A informação litológica é retirada de MANUPPELLA *et al.* (1987). As formações cretácicas caracterizam-se pela ocorrência de calcários, margas, conglomerados, dolomitos, argilas e arenitos. O Miocénico caracteriza-se por calcários, siltes, conglomerados e bio-calcarenitos. As formações recentes são essencialmente constituídas por areias, cascalheiras, siltes e argilas.

No âmbito de um Protocolo de Cooperação entre o INAG e a Faculdade de Ciências de Lisboa (INAG, 1997), foram definidos os sistemas aquíferos de Portugal Continental. Na região em estudo foram caracterizados três sistemas aquíferos, cujas características geológicas se referem (entre parentesis indicam-se os códigos de designação dos sistemas aquíferos utilizados na tabela de relacionamento SISTAQ.EXPAND (Quadro 2)):

- Campina de Faro: aquífero confinado multicamada, constituído pelas formações detríticas e carbonatadas do Miocénico (SISTAQ = 1012) e aquífero livre constituído pelas areias, arenitos e argilas do Quaternário (SISTAQ = 1011);
- Chão de Cevada-Quinta João de Ourém: aquífero cársico, livre e confinado, constituído por calcários, calcários dolomíticos, margas e dolomitos, do Cretácico superior (SISTAQ = 102);
- São João da Venda-Quelfes: caracterizado por arenitos, conglomerados, argilas, calcários, calcários margosos e margas, do Cretácico (SISTAQ = 103).

Apresenta-se o teste dos procedimentos desenvolvidos para a cartografia automática do método DRASTIC, aplicado a duas situações distintas: (1) a vulnerabilidade relativa às formações geológicas aflorantes (aquíferos livres); (2) a vulnerabilidade do subsistema aquífero livre da Campina de Faro.

7.2 Índice DRASTIC das formações geológicas aflorantes

A caracterização do parâmetro D utilizou os dados fornecidos pela DRARN-Algarve, relativamente ao inventário de pontos de água subterrânea levado a cabo por esta Direcção Regional. Foram utilizados elementos de profundidade ao nível freático relativos a 25 pontos de água. Estes elementos não se distribuem uniformemente por toda a área estudada, havendo lacunas na zona norte, onde ocorrem as formações do Cretácico, e na zona ocupada por sapais e areias de duna. O procedimento utilizado foi a interpolação/extrapolação para toda a área de estudo. Para as zonas ocupadas por aluviões de leitos de rios actuais e por sapais foi depois atribuído o índice 10, porque nestas áreas é de esperar que o nível freático se encontre próximo da superfície. A profundidade do nível freático das areias de duna deverá ser maior do que a das aluviões e sapais pelo que foi atribuído o índice 9. Como critérios para esta decisão apontam-se a maior altura que estas formações podem atingir, o facto de constituírem pequenas ilhas e a condutividade hidráulica mais elevada o que implicará um escoamento subterrâneo mais rápido.

O parâmetro R foi atribuído utilizando o método de VERMEULEN *et al.* (1993, 1994). Os valores de precipitação na área foram estimados entre 500 mm/ano e 600 mm/ano. Com a informação proveniente da Carta de Solos à escala 1:50 000, número 53-A: Faro e com informação da carta *Corine Land-Cover* à escala 1:100 000, obtiveram-se valores de recarga entre 65 mm/ano e 285 mm/ano. Os valores obtidos enquadram-se nos valores publicados por outros autores para esta região (PNUD *et al.*, 1981; COSTA *et al.*, 1985; RODRIGUES e ROQUE, 1990; LOBO-FERREIRA, 1981).

Os parâmetros A, I e C, foram atribuídos utilizando a tabela de relacionamento **GEOLOG.EXPAND** (Quadro 1).

O parâmetro S foi atribuído utilizando a tabela de relacionamento **S_DRASTIC.EXPAND** (Quadro 3), sendo a informação proveniente da Carta de Solos à escala 1:50 000, número 53-A: Faro .

O parâmetro T foi caracterizado a partir das curvas de nível da Carta Militar de Portugal à escala 1:25000 de Faro (carta nº 611), utilizando um ábaco que relaciona os espaçamentos das curvas de nível com as classes de declives do método DRASTIC.

O mapa com o índice DRASTIC, é apresentado na figura 1.

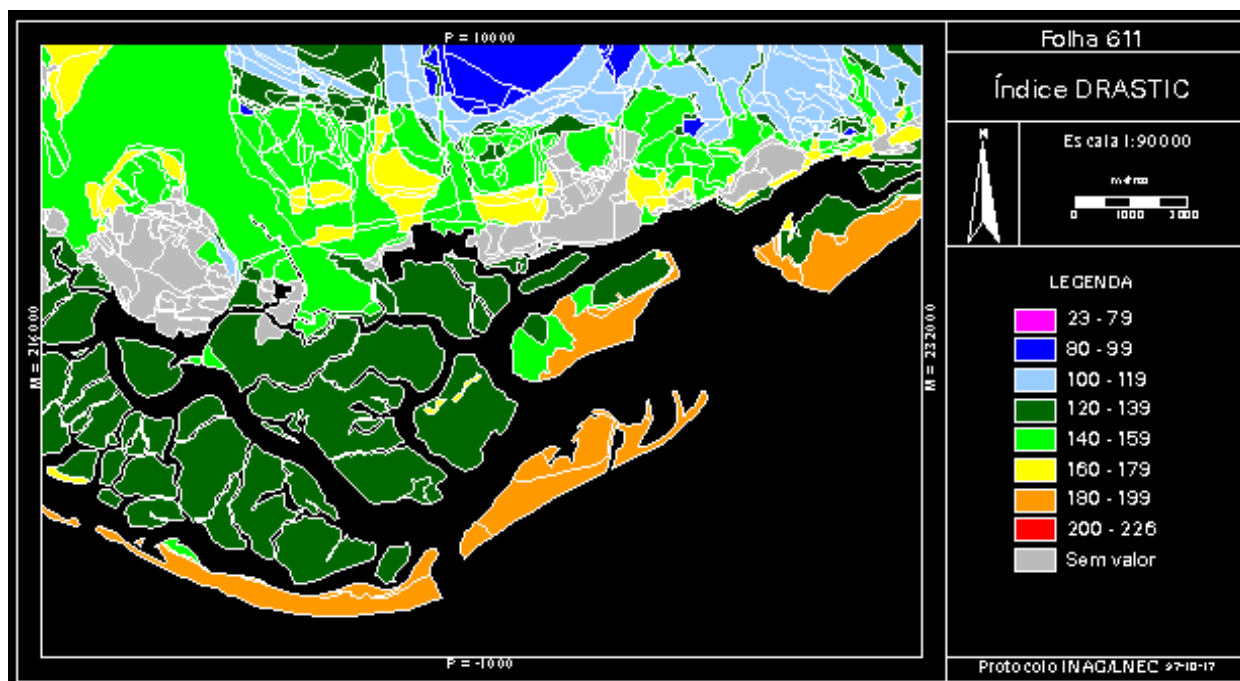


Figura 1 - Índice DRASTIC das formações geológicas aflorantes na área de Faro.

7.3 Índice DRASTIC do subsistema aquífero livre da Campina de Faro

A caracterização do parâmetro D, foi feita da mesma forma que para o caso das formações geológicas aflorantes, utilizando os mesmos dados mas, restritos à área agora em análise. Ao todo utilizou-se informação relativa a 20 pontos de água. O procedimento utilizado foi a interpolação/extrapolação para toda a área de estudo. Pelas mesmas razões apontadas em 7.2, para as zonas ocupadas por aluviões de leitos de rios actuais foi atribuído o índice 10.

Os parâmetro R, S e T foram caracterizados da mesma forma que em 7.2.

Os parâmetros A, I e C foram caracterizados a partir da informação geral para a litologia deste subsistema aquífero e utilizando a tabela de relacionamento SISTAQ.EXPAND (Quadro 2).

O mapa com o índice DRASTIC é apresentado na figura 2.

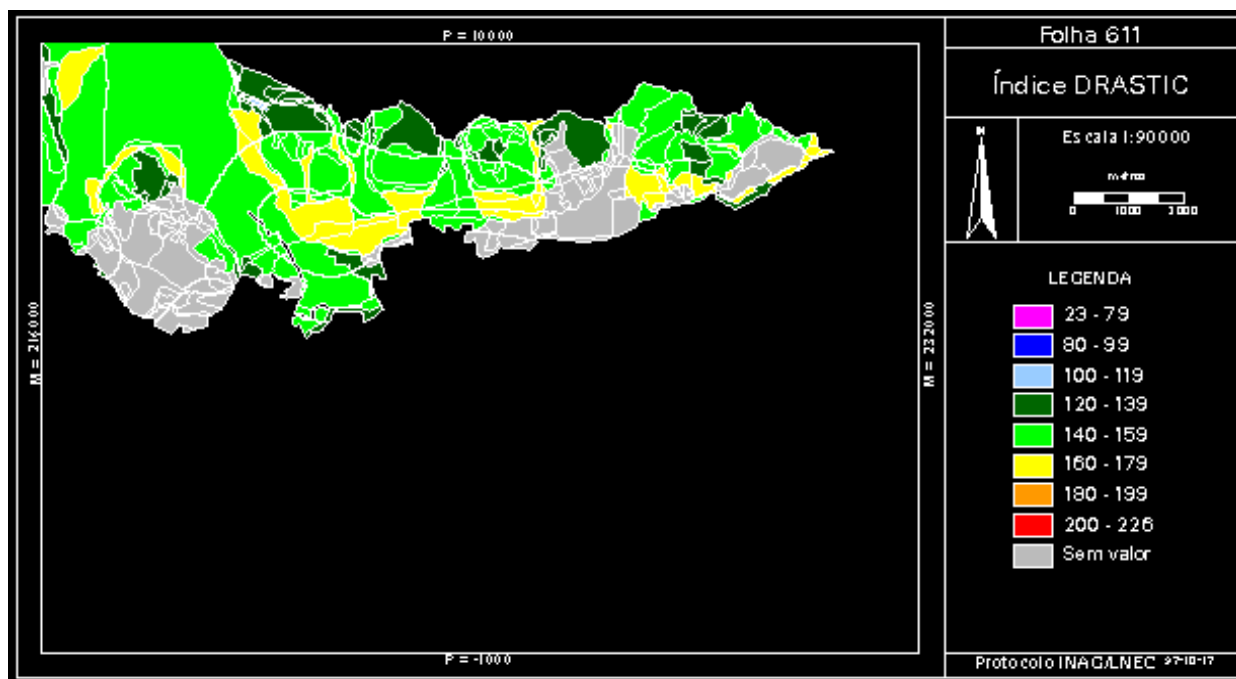


Figura 2 - Índice DRASTIC do subsistema aquífero livre da Campina de Faro.

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto da Água que mediante o Protocolo de Cooperação com o LNEC possibilitou a realização dos estudos apresentados.

Ao Dr. Leitão de Freitas e à Eng^a Edite Reis, da Divisão dos Recursos Hídricos da Direcção Regional do Ambiente e Recursos Naturais do Algarve, a cedência de dados do inventário de pontos de água subterrânea, que permitiram o teste da metodologia na área de Faro.

À Técnica Maria José Henriques, do Grupo de Investigação de Águas Subterrâneas do LNEC, pela actividade exercida com o sistema de informação geográfica ARC/INFO[®].

Ao Dr. Miguel Gamboa, do Grupo de Hidroinformática do LNEC pela cedência da informação necessária para a caracterização automática do parâmetro Topografia.

BIBLIOGRAFIA

ALLER, L., T. BENNET, J.H. LEHR e R.J. PETTY - *DRASTIC: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*, U.S. EPA Report 600/2-85/018, 1987.

ALMEIDA, C.A.C. - *Hidrogeologia do Algarve Central*. Lisboa, Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa para obtenção do grau de Doutor em Geologia, 1985.

COSTA, F.E., BRITES, J.A., PEDROSA, M.Y. e VIEIRA DA SILVA, A. - *Carta hidrogeológica da orla algarvia*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, 1985.

DUIJVENBOODEN, W. e WAEGENINGH, H.G. - *Vulnerability of soil and groundwater to pollutants*. Proceedings and information n^o 38 of the International Conference held in the Netherlands, in 1987. TNO Committee on Hydrological Research, 1987

- INAG - *Definição, Caracterização e Cartografia dos Sistemas Aquíferos de Portugal Continental*. Direcção de Serviços de Recursos Hídricos, Divisão de Recursos Hídricos, 1997.
- INMG - *O Clima de Portugal*. Fasc. XLIX, vols. 1 a 4: região de Entre Douro e Minho e Beira Litoral (vol. 1), região de Ribatejo e Oeste (vol. 2), região de Trás-os-Montes e Alto Douro e Beira Interior (vol. 3) e região de Alentejo e Algarve (vol. 4). Lisboa, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica, 1991.
- LOBO-FERREIRA, J.P. - "Modelação matemática do balanço hídrico sequencial diário. Exemplo de aplicação à região algarvia (Faro)". Comunicação ao Seminário *Os recursos hídricos subterrâneos e a sua utilização. O caso do Algarve*. Lisboa, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 1981.
- LOBO-FERREIRA, J.P. e OLIVEIRA, M.M. - *Desenvolvimento de um inventário das águas subterrâneas de Portugal - Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos e mapeamento DRASTIC da vulnerabilidade dos aquíferos de Portugal*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 179/93 - GIAS, 1993.
- MANUPPELLA, G., RAMALHO, M., ANTUNES, A.T. e PAIS, J. - *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50 000, Folha 53-A Faro*. Lisboa, Serviços Geológicos de Portugal, 1987.
- OLIVEIRA, M.M e LOBO-FERREIRA, J.P. - "Avaliação da vulnerabilidade à poluição dos aquíferos superficiais da Península de Setúbal utilizando o método DRASTIC", in *2º Congresso da Água, O Presente e o Futuro da Água em Portugal*. Lisboa, 12-14 Abril, pp. III-251 a III-264, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 1994.
- OLIVEIRA, M.M., LOBO-FERREIRA, J.P. e MOINANTE, M.J. - "Avaliação da vulnerabilidade à poluição dos aquíferos superficiais da faixa costeira de Portugal Continental utilizando o método DRASTIC: caracterização dos parâmetros DRASTIC", in *3º Congresso da Água, A Água em Portugal, Por uma Política de Excelência*. Lisboa, 25-29 Março, pp. III-147 a III-156, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 1996.
- OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J., LOBO-FERREIRA, J.P. - *Cartografia Automática da Vulnerabilidade de Aquíferos com base na Aplicação do Método DRASTIC. Relatório Final*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, relatório 60/97-GIAS, 1997.
- OLIVEIRA, M.M., MOINANTE, M.J., LOBO-FERREIRA, J.P. - "Determinação da Recarga de Águas Subterrâneas a partir da Análise de Hidrogramas de Escoamento", in *Seminário sobre Águas Subterrâneas*, Lisboa, APRH, 10 a 12 de Dezembro, 1997a.
- PNUD, DGRAH e UNESCO - *Évaluation des ressources en eaux des systèmes aquifères de l'Algarve: rapport final sur les résultats du projet, conclusions et recommandations*. Lisboa, Programme des Nations Unies pour le Développement, Direcção-Geral dos Recursos e Aproveitamentos Hidráulicos e Organisation des Nations Unies pour l'Education la Science et la Culture, PNUD/POR/79/001, 1981.
- RODRIGUES, J.D. e ROQUE, A. - *Inventário dos recursos hídricos subterrâneos do Algarve e Alentejo*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Relatório 97/90-NP , 1990.
- SILVA, M.J.B.L. - *Hidrogeologia do Miocénico do Algarve*. Lisboa, Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, para obtenção do grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia, série teses de doutoramento e mestrado, secção de Geologia Económica e Aplicada, 1988.
- VERMEULEN, H., LOBO-FERREIRA, J.P. e OLIVEIRA, M.M. - "A method for estimating aquifer recharge in DRASTIC vulnerability mapping". Comunicação apresentada ao seminário *Águas Subterrâneas e Ambiente*, realizado pela Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH) em Lisboa, em Maio de 1993, e *Proceedings of the Second*

European Conference on Advances in Water Resources Technology and Management, pp. 275-282, Rotterdam, A.A. Balkema, European Water Resources Association, 1994.