

EXCERTO DO RELATÓRIO TÉCNICO

Sistema Aquífero Estremoz - Cano

PARTE 6 - Caracterização Hidrodinâmica

Carla Pinto Midões

6 – Caracterização Hidrodinâmica

6.1 - Ensaio de Bombagem

O ensaio de bombagem obedece a uma metodologia muito simples de leitura da evolução dos níveis de água no furo que está a ser bombeado e/ou em piezómetros, cuja interpretação permite obter informações sobre o furo e as características do reservatório subterrâneo.

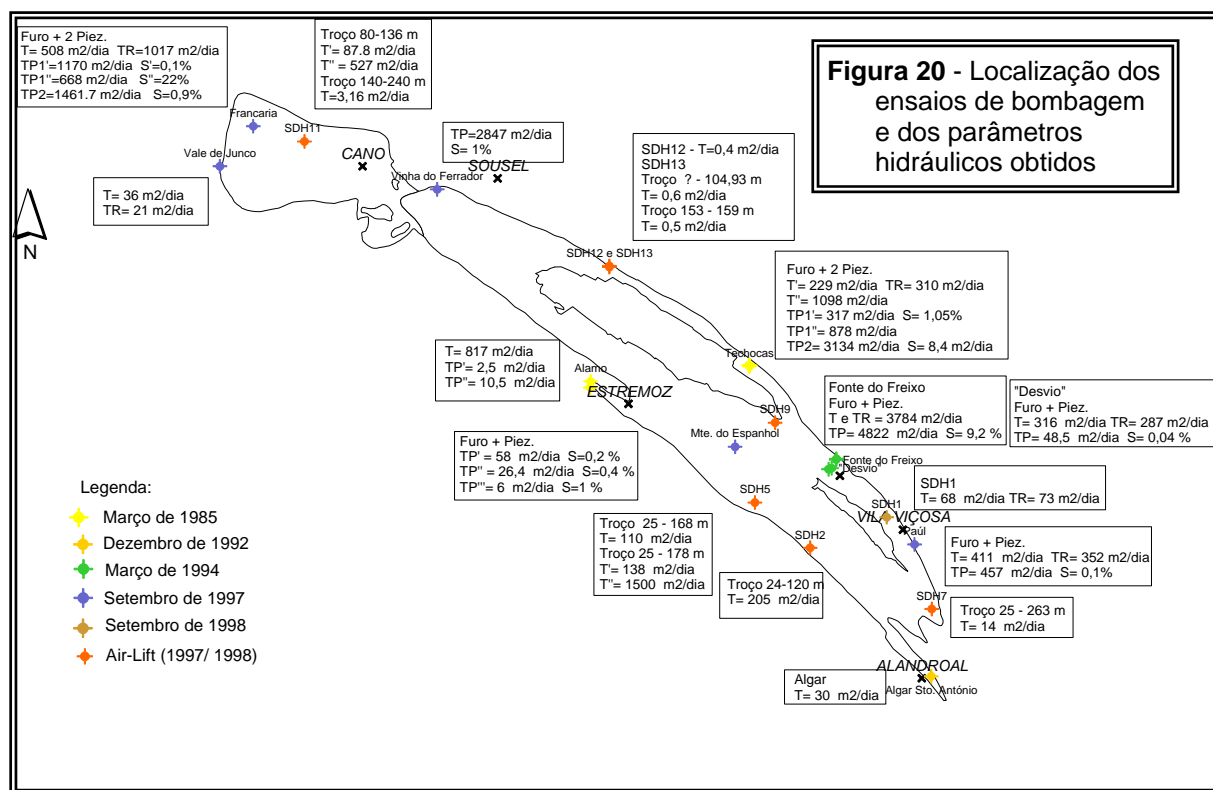
Quanto ao furo permite saber a qualidade da construção, a existência de perdas de carga por atrito de água nas imediações do furo e ainda o caudal de bombagem mais aconselhável. No que se refere ao aquífero pode fornecer dados sobre: transmissividade, coeficiente de armazenamento, grau de conexão hidráulica entre diferentes sistemas aquíferos, existência de barreiras impermeáveis, zonas de recarga, etc. (Martinez e Lopez, 1984).

A realização e interpretação dos resultados de um ensaio de bombagem são de um modo geral acompanhadas por inúmeras dificuldades. A ausência de situações ideais no campo para a realização do ensaio, como por exemplo a existência de um furo que possa bombear durante horas ou dias consecutivos, constitui um grande obstáculo que só poderá ser ultrapassado com a colaboração e compreensão dos proprietários desses furos.

A interpretação dos resultados de um ensaio de bombagem pode ser igualmente difícil se estivermos, como é o caso, na presença de rochas fracturadas onde o desconhecimento de intensidade e direcção de fracturação é grande. Segundo Pinto, 1987 devido a esta complexidade os ensaios de bombagem tem tido muitas dificuldades em ser aceites como instrumento útil, não só no estudo de aquíferos de porosidade de fractura, como também nos aquíferos de porosidade dupla (intergranular e fractura).

Como objectivo de caracterizar hidrodinamicamente o sistema aquífero Estremoz-Cano foram realizados vários ensaios de bombagem com recurso a bomba submersível e à injeção de ar comprimido (Air-Lift). Por forma a completar este estudo e caracterizar uma maior área deste sistema foram utilizados ensaios de bombagem realizados pelo Departamento de Hidrogeologia do Instituto Geológico e Mineiro.

Na **figura 20** está representada a localização geográfica dos ensaios e os parâmetros hidráulicos obtidos.



No tratamento dos dados foi utilizado o método de Jacob. Este método constitui uma simplificação do método de Theis que poderá ser aplicada em aquíferos livres e regime variável desde que se proceda à correcção de Dupuit:

$$s_{\text{corrigido}} = s - \frac{s^2}{2H_0}$$

em que: s - rebaixamento

H_0 - espessura saturada inicial do aquífero

Esta correcção não é necessário fazer se os rebaixamentos forem inferiores a 15 por 100 da espessura saturada do aquífero.

A simplificação de Jacob pode utilizar-se quando $u < 0.1$ sendo:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt}$$

a partir da expressão determina-se a o período de validade de Jacob ou seja o tempo a partir do qual são válidas as leituras efectuadas.

A expressão do rebaixamento dada por Jacob é a seguinte:

$$s = 0.183 \frac{Q}{T} \log \frac{2.25Tt}{r^2 S}$$

em que:

s - rebaixamento num ponto situado à distância r do furo bombeado

Q - caudal de bombagem constante

T - transmissividade do aquífero

S - coeficiente de armazenamento do aquífero

t - tempo decorrido desde que se iniciou a bombagem

Os valores de rebaixamento versus tempo, obtidos no campo, são projectados num gráfico semilogaritmico, aos quais é ajustada uma recta. A partir do pendore desta recta determina-se o valor de transmissividade que é dado pela expressão:

$$T = 0.183 \frac{Q}{\Delta s}$$

Δs -variação do rebaixamento num ciclo logarítmico

Para obter o coeficiente de armazenamento, é necessário medir o valor de t onde a recta ajustada aos pontos corta o eixo das abcissas. Este tempo é denominado t_0 e obtém-se:

$$t_0 = \frac{r^2 S}{2.25T} \rightarrow S = \frac{2.25T t_0}{r^2}$$

À semelhança do que acontece no método de Theis, o método de Jacob não permite o calculo do coeficiente de armazenamento no furo que foi bombeado, uma vez que as perdas de carga no furo falseariam os resultados. Isto porque nas proximidades do furo bombeado existem certas alterações, como desagregação do material, zonas mais permeáveis por efeito de desenvolvimento, etc., que fazem com que o diâmetro eficaz não coincida com o diâmetro de perfuração (Martinez e Lopez, 1984).

Sendo assim, é possível obter a transmissividade no furo bombeado enquanto que nos piezómetros podemos calcular a transmissividade e o coeficiente de armazenamento.

No tratamento dos dados sempre que existia um piezometro foi definido o período de validade do método de Jacob ou seja o tempo a partir do qual são válidas as leituras efectuadas, ajustando-se em seguida uma nova recta e calculou-se outra transmissividade e coeficiente de armazenamento.

◆ Ensaio com Bomba submersível

Os ensaios de bombagem foram feitos a caudal constante, regime variável seguidos por ensaios de recuperação sempre que possível.

Os ensaios de recuperação, consistem na medição dos níveis a partir do momento em que se interrompe a bombagem, e permitem comprovar o grau de conexão hidráulica entre a captação e o aquífero. É possível ainda verificar as condições em que foi realizado o ensaio, ou seja, se houve reciclagem de água, recargas exteriores, ou se o aquífero é limitado.

Em Março de 1985, foram efectuados ensaios de bombagem e/ou recuperação nos furos de abastecimento público da Câmara Municipal de Estremoz, das Techocas (nº inv. F2, F3 e F4/412) e Álamo (nº inv. F2/425) e ainda um ensaio de recuperação num furo particular (nº inv. F3/425).

O ensaio realizado nas Techocas teve a particularidade de ter sido possível medir os níveis na captação (F2/412) e em mais dois furos que serviram de piezómetros (3 e F4/412) situados a 18.2 e 68 m do furo de bombagem. Merece ainda referência as direcções definidas pelos três pontos correspondentes às três captações. Os furos 2 e 3 encontram-se segundo uma direcção N60°W, ou seja segundo uma direcção próxima da estratificação, os furos 2 e 4 apresentam uma direcção N50°E encontrando-se alinhados segundo a direcção predominante dos acidentes tectónicos cisalhantes transversais à estrutura.

Segundo Costa (1985) podemos dizer que estamos numa área onde existe uma forte anisotropia nos parâmetros físicos do aquífero carbonatado câmbrico.

A permeabilidade do aquífero, admitindo a espessura constante, chega a ser cerca de 3 a 10 vezes superior na direcção NE-SW comparativamente com a direcção NW-SE. O mesmo se verificando em relação ao coeficiente de armazenamento. O valor de transmissividade obtido na direcção NE-SW (superior a 3000 m²/dia) resulta provavelmente de um desenvolvimento preferencial da carsificação nesta direcção.

Na sequência carbonatada em presença afectada por metamorfismo a estratificação não parece condicionar grandemente o desenvolvimento da carsificação e as direcção de fluxo. Num contexto mais local as direcção de fluxo são certamente condicionadas pelos acidentes tectónicos transversais (NE-SW).

Os valores de transmissividade (2.5 a 10.5 m²/dia) obtidos no ensaio de recuperação efectuado no furo particular que fica perto do furo do Álamo destacam-se por serem muito mais baixos que os restantes. No furo do Álamo o valor mínimo obtido foi de 817 m²/dia.

É notório o contraste entre o aquífero carbonatado câmbrico e os níveis aquíferos que se podem captar nos metavulcanitos e xistos que se sucedem às formações carbonatadas.

Efectivamente apesar de próximos espacialmente os furos 2 e 3/425 encontram-se em situações geológicas e hidrogeológicas completamente diferentes.

A caracterização hidroquímica realizada nestes furos revelou igualmente algumas diferenças nomeadamente nos índices de saturação relativos à calcite e à dolomite. Verifica-se que a água captada no furo 3 é subsaturadaa em relação à calcite enquanto

que a do furo 2 é sobressaturada. Já em relação à dolomite mantém-se uma situação de sobressaturação, embora o índice de saturação respectivo sofra uma redução significativa quando se comparam os valores obtidos para as águas dos furos 2 e 3 (2.7563 e 1.3760, respectivamente). Apesar da interpretação efectuada, tendo em conta a complexidade geológica da área seja um pouco especulativa é contudo viável admitir que embora com grandes perdas de carga e algumas modificações hidroquímicas o aquífero carbonatado paleozóico cede alguma água às formações envolvente, aproveitando, eventualmente, alguns dos múltiplos acidentes tectónicos transversais à estrutura anticlinal hercínica (Costa, 1985).

Em Dezembro de 1992 no algar de Sto. António, foi realizado um ensaio de bombagem tendo-se obtido um caudal específico de 1 l/s/m e uma transmissividade de 30 m²/dia.

Dos trabalhos hidrogeológicos realizados Departamento do Hidrogeologia do IGM no anticlinal de Estremoz é de referir ainda os ensaios efectuados nos furos de abastecimento público da Câmara Municipal de Borba, da Fonte do Freixo e no furo localmente designado de “furo junto ao desvio”, ambos muito próximos de Borba e da estrada (IP7) que vai para Elvas, realizados sobre os calcários paleozóicos em captações pouco profundas.

Na Fonte do Freixo foram utilizados dois furos: o furo mais a sul que foi bombeado e o furo norte que serviu apenas de piezómetro não tendo sido ensaiado. No furo bombeado (furo sul) os parâmetros físicos do aquífero foram: $T = 4822 \text{ m}^2/\text{dia}$, $T = 4099 \text{ m}^2/\text{dia}$ (em recuperação) e $S = 0.092$. A transmissividade obtida no piezómetro (furo norte) foi igual tanto na recuperação como na bombagem do furo sul ($T = 3784 \text{ m}^2/\text{dia}$).

Os resultados deste ensaio são concordantes com as características do sistema aquífero carbonatado cársico desta região em zonas onde este é aquífero livre e apresenta maiores permeabilidades (Costa, 1994).

Através da observação da geologia é possível verificar que esta captação poderá estar a beneficiar de uma dobra anticlinal secundária e ainda de estruturas cársicas desenvolvidas na região.

Durante o ensaio de recuperação não se evidenciaram quaisquer efeitos de esvaziamento do aquífero o que quer dizer que os cerca de 1300 m³ de água extraídos durante o ensaio de bombagem são insignificantes em relação ao volume total de recursos que este aquífero comporta.

No outro local ensaiado foram utilizados: um furo camarário “furo junto ao desvio” (nº inv.F28/426) e um furo particular (nº inv.F29/426) que serviu de piezómetro. Os parâmetros físicos do aquífero obtidos foram os seguintes: $T = 316 \text{ m}^2/\text{dia}$, $T = 287 \text{ m}^2/\text{dia}$ (em recuperação), $S = 3.92 \times 10^{-4}$ e no piezómetro $T = 48.5 \text{ m}^2/\text{dia}$.

Perante os resultados pode concluir-se que esta captação se situa numa zona em que o aquífero já não é livre uma vez que o coeficiente de armazenamento é reduzido. Este facto pode ser explicado por um aumento da espessura dos níveis de metavulcanitos no topo da sequência sedimentar que desempenham a função de confinantes (Costa, 1994). A permeabilidade do aquífero é elevada (da ordem dos $300 \text{ m}^2/\text{dia}$), devendo diminuir na área envolvente tal como sugere o valor de transmissividade obtido no piezómetro que foi de $48.5 \text{ m}^2/\text{dia}$. Uma vez que não são conhecidas as características técnicas construtivas do furo particular, esta captação poderá ser incompleta ou ter outros defeitos de construção que afectem os valores considerados. As características hidráulicas do aquífero, na área da captação de abastecimento público, possibilitam a extracção de caudais superiores aos actualmente captados, prevalecendo as limitações inerentes ao diâmetro da coluna de revestimento definitivo que foi aplicada neste furo (Costa, 1994).

Na campanha realizada em Setembro de 1997 por uma equipa do IGM e outra do INAG, foram ensaiados 5 pontos (**figura 20**), nestes é possível verificar a grande heterogeneidade do meio (Midões *et al.*, 1997).

Na extremidade NW do sistema aquífero, procedeu-se à realização de 2 ensaios de caudal, um em Vale de Junco e outro na Francaria.

Em Vale de Junco foi utilizado um furo de bombagem e um piezómetro situado a uma distância de 158 metros para N15°E do furo. Durante o ensaio que teve a duração de 29h:35min. e um caudal constante de aproximadamente 3.6 l/s não foi registada qualquer alteração no nível da água no piezómetro. Sendo assim, foram apenas feitas leituras na captação, tendo-se calculado o valor da transmissividade na recuperação ($T_r = 21 \text{ m}^2/\text{dia}$). Este ensaio realizado sobre as rochas xistentas do Silúrico, para além de demonstrar a possível inexistência de conectividade entre estes dois furos distanciados apenas 158 m traduz a baixa transmissividade que caracteriza este tipo de rochas quando comparada com a transmissividade que ocorre nos calcários lacustres, na zona da Francaria.

O ensaio realizado na Francaria sobre os calcários lacustres do Cano contou com um furo de bombagem e dois piezómetros situados a 4 e 81.5 metros de distância do furo de bombagem. Tendo sido também efectuado um ensaio de recuperação. O ensaio teve a duração de 6 horas e foi feito com um caudal constante de aproximadamente 7.4 l/s.

Os valores de transmissividade obtidos variaram entre os 669 e os 1462 m²/dia e os valores de coeficiente de armazenamento entre os 0,1 e os 22 %.

No piezometro 1 (localizado a 4 m da captação) verificou-se que sensivelmente a partir dos 80 minutos houve uma diminuição da transmissividade e aumento do coeficiente de armazenamento.

Este facto parece sugerir que a existência de 2 zonas com diferente grau de fracturação. Uma zona mais fracturada e permeável à superfície, com transmissividade de 1170 m² /dia e S= 0.1 % e outra, em profundidade, menos “fracturada” com transmissividade igual a 669 m² /dia e S = 22 %.

Na Vinha do Ferrador, foi realizado apenas um ensaio com medição só possível no piezómetro que se encontrava a 45 metros da captação, e que apresentava 19 metros de profundidade. Este ensaio que teve a duração de 5 horas e foi feito com um caudal constante de aproximadamente 8 l/s decorreu nas formações carbonatadas paleozóicas do anticlinal de Estremoz. Os parâmetros hidráulicos calculados foram a transmissividade de 2847 m² /dia e o coeficiente de armazenamento de 1 %.

O Monte do Espanhol constitui uma situação mais favorável que a anterior, uma vez que foi possível efectuar leituras na captação e num piezómetro localizado a 9 metros de distância. O ensaio teve a duração de 5h:39min. e foi feito com um caudal constante de aproximadamente 4 l/s.

No piezómetro obtiveram-se 3 valores de transmissividade e de coeficiente de armazenamento. T1= 58 m²/dia, S=0.2; T2= 26 m² /dia, S=0.5 % e T3= 6 m² /dia, S= 1% o que poderá estar relacionado com a existência de várias barreiras impermeáveis.

A análise dos dados obtidos na captação e durante o ensaio de recuperação (TR1= 28 m²/dia Tr2=126 m²/dia) parecem também demonstrar que se trata de um reservatório limitado localizado na formação dolomítica. O ensaio realizado no Monte do Espanhol, apresenta transmissividades muito inferiores às que, de um modo geral, caracterizam o sistema aquífero de Estremoz. Este facto parece sugerir a existência de barreiras impermeáveis que compartimentam o sistema.

A análise da piezometria regional efectuada no mês em que se realizou o ensaio vem confirmar que se trata de um nível diferente, que se enquadra num modelo regional que se caracteriza pela ocorrência de vários níveis suspensos.

No Paúl, local a SW de Vila Viçosa, foi efectuado um ensaio de bombagem sobre mármores parcialmente dolomitizados, seguido de recuperação. O ensaio teve a duração de 7 horas e foi feito com um caudal constante de aproximadamente 4 l/s.

Os parâmetros hidráulicos foram calculados com base nas leituras efectuadas na captação e num piezómetro que dista 32,5 metros da captação. Os valores de transmissividade, obtidos durante o ensaio de bombagem e durante o ensaio de recuperação (Tr) são muito semelhantes da ordem dos 400 m²/dia. O coeficiente de armazenamento obtido foi de 0.1 %. Durante a recuperação dos níveis não se verificou qualquer efeito de esvaziamento, o que quer dizer que o caudal extraído durante o ensaio (≈120 m³) é insignificante em relação ao volume total de recursos que este aquífero comporta.

Com base nos parâmetros estimados podemos ainda calcular o raio de influência das captações através da expressão:

$$R = 1.5 \sqrt{\frac{Tt}{S}}$$

em que: **R** – raio de influência (metros);

T – transmissividade (m²/dia);

S – coeficiente de armazenamento (adimensional);

t – tempo de bombagem (dias)

Para a **Vinha do Ferrador**:

O raio de influência na Vinha do Ferrador para 5 horas de bombagem a um caudal de 700 m³/dia é de 365,3 m, para outros periodos de tempo será:

24 horas-----800 metros

1 semana-----2118 metros

1 mês-----4384 metros

Para o **Paúl**:

Com um caudal de 337 m³/dia e considerando uma transmissividade média de 403 m²/dia o raio de influência para as 7 horas de bombagem ininterrupta é de 514 m. Para outros períodos de tempo seria:

24 horas-----952 metros

1 semana-----2519 metros

1 mês-----5216 metros

Foi igualmente realizada, em Setembro de 1998, uma campanha de ensaios de bombagem nos furos executados pelo IGM com recurso a uma bomba submersível. Desta campanha apenas o ensaio da SDH1-Vila Viçosa produziu resultados, o ensaio realizado na sondagem SDH2- Rio de Moinhos foi abortado ao fim de três horas de bombagem uma vez que o reduzido caudal de extracção da bomba não provocou qualquer rebaixamento no nível.

O ensaio de bombagem seguido de recuperação realizado no furo SDH1-Vila Viçosa, produziu valores de transmissividade muito semelhantes, $T = 68 \text{ m}^2/\text{dia}$ e $73 \text{ m}^2/\text{dia}$ respectivamente.

O ensaio teve a duração de 6 h:15 min. e foi feito com um caudal constante de aproximadamente 0.6 l/s.

A análise da evolução dos níveis não é demonstrativa da existência de qualquer anomalia, no entanto este facto só poderá ser confirmado com a realização de um ensaio de longa duração e utilização de piezómetros.

Os baixos valores de transmissividade obtidos são característicos de um furo situado próximo de formações de baixa permeabilidade, neste caso de metavulcanitos.

A variabilidade dos resultados obtidos pelos diferentes autores e nas campanhas realizadas vem confirmar e reforçar a heterogeneidade do meio no que se refere ao grau de fracturação, carsificação e alternância litológica da sequência vulcano-sedimentar.

◆ Ensaio de bombagem com ar comprimido (Air-Lift)

Os ensaios de bombagem com ar comprimido são frequentemente utilizados no desenvolvimento de sondagens, permitindo obter uma aproximação dos parâmetros hidrogeológicos do aquífero e por outro lado eliminar uma certa percentagem de material fino que não pode nem deve ser retido nos sistemas de filtros da bomba submersível.

O método consiste na injeção de ar na sondagem, que origina a saída da coluna de água. Este processo decorre durante algumas horas, com medições periódicas do caudal (água extraída) e do nível hidrodinâmico.

Com a paragem da injeção de ar temos a recuperação dos níveis, é esta recuperação que deve ser registada o mais rigorosamente possível, uma vez que são os dados do ensaio de recuperação que vão ser utilizados para estimar a transmissividade do aquífero no troço ensaiado.

Este tipo de ensaio foi efectuado em todas as sondagens à mediada que se avançava na perfuração, sendo assim temos valores de transmissividades para diferentes troços de uma mesma sondagem.

6.2 - Piezometria

A realização periódica de medições do nível piezométrico é de extrema importância para o conhecimento do funcionamento hidráulico dos sistemas aquíferos, podendo-se a partir deste estudo retirar algumas ilações no que se refere ao sentido de fluxo, gradiente hidráulico, áreas de recarga e descarga, etc.

A área onde se desenvolvem os trabalhos foi sujeita a coordenação topográfica dos pontos de água (furos e poços). O método utilizado foi o GPS (Global Positioning System), por apresentar vantagens ao nível de precisão altimétrica e planimétrica, tempo de execução e custo. O método permitiu uma precisão altimétrica superior a 5 cm no que se refere à altitude ortométrica e forneceu coordenadas planimétricas com precisão da ordem dos centímetros (Duarte *et al.*, 1997).

O nível das águas subterrâneas varia com o tempo de forma muito diversa. Estas variações podem ser pequenas em aquíferos não explorados, no entanto podem ser muito importantes em aquíferos com núcleos de bombagem intenso (Custódio & Llamas, 1983).

Podemos distinguir dois tipos principais de oscilações piezométricas, segundo Custódio e Llamas, 1983:

- oscilações rápidas cuja duração varia desde menos de um minuto a pouco mais de um dia;
- oscilações de longo período que se repetem com base num ciclo semianual, anual ou de vários anos.

Na área em estudo outro tipo de variação piezométrica pode e deve ser considerada: é o caso da oscilação dos níveis provocada pela extracção de água subterrânea para fins agrícolas e para a exploração de rocha ornamental (tema a desenvolver mais à frente).

Na **tabela 11** está representado o número de pontos de água controlados em cada campanha pelo INAG no anticlinal de Estremoz durante os anos de 1997, 1998 e 1999.

Tabela 11 - Número de pontos de água controlados em cada campanha

	Jul-97	Set-97	Dez-97	Fev-98	Abr-98	Jun-98	Ago-98	Out-98	Jan-99
Número de pontos controlados	80	78	132	114	148	135	141	142	138

A selecção dos pontos nos quais se procedeu à caracterização piezométrica obedeceu a alguns critérios:

- furos/poços inactivos, ou seja que não sejam sujeitos a extracções intensas e contínuas;
- furos/poços que não fiquem nas imediações de pontos sujeitos a extracção intensas e contínuas;
- pontos de água que se encontrem afastados da industria extractiva ou de qualquer outro tipo de actividade susceptível de provocar a variação do nível piezométrico;
- pontos de água com profundidade conhecida.

Nas **figuras 21 a 29** encontram-se representadas as localizações dos pontos de água controlados piezometricamente nas diferentes campanhas, bem como o nível piezométrico determinado.

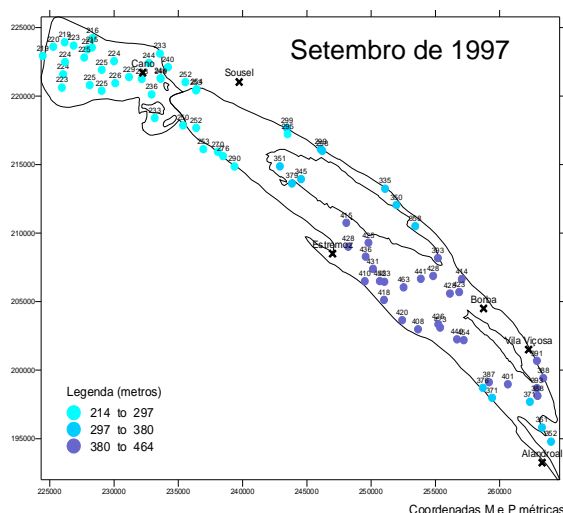
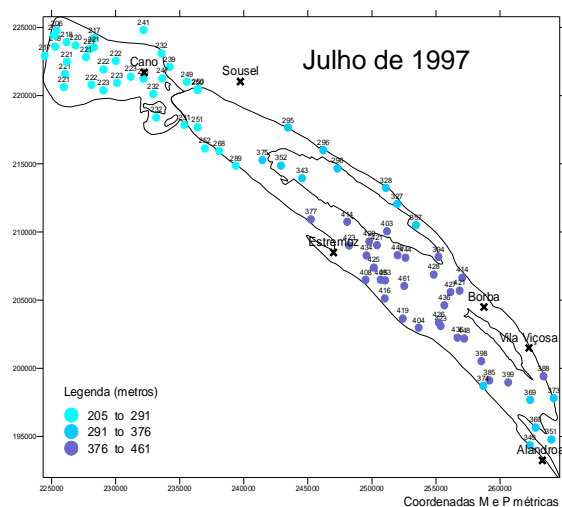


Figura 21 e 22 - Localizações dos pontos de água controlados piezometricamente e nível estático

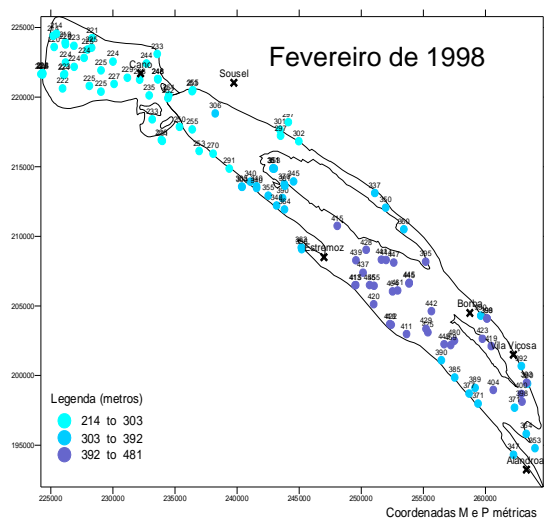
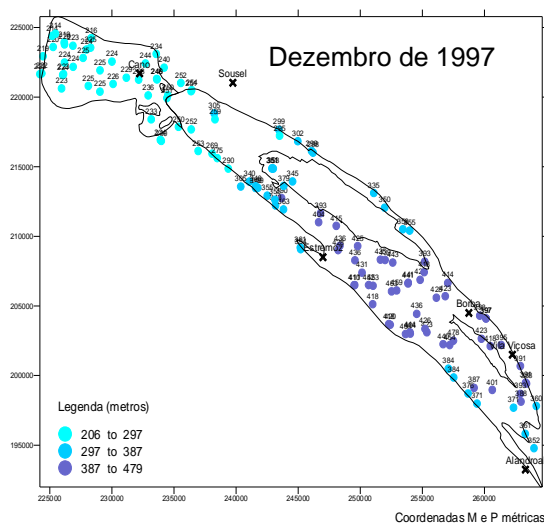


Figura 23 e 24 - Localizações dos pontos de água controlados piezometricamente e nível estático

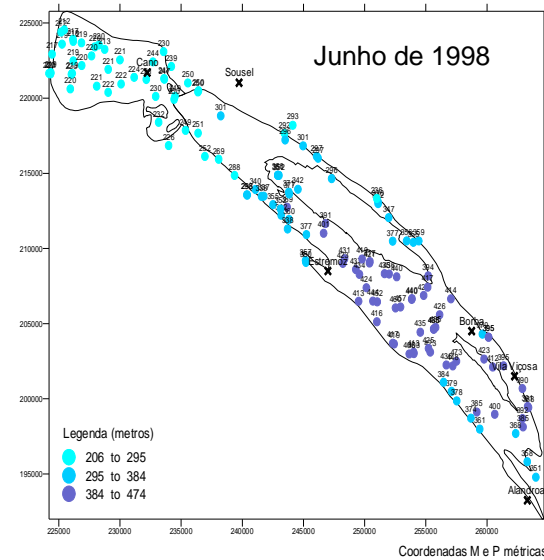
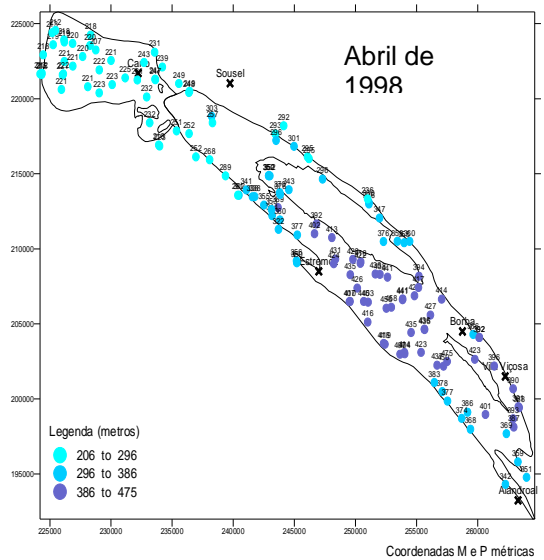


Figura 25 e 26 - Localizações dos pontos de água controlados piezometricamente e nível estático

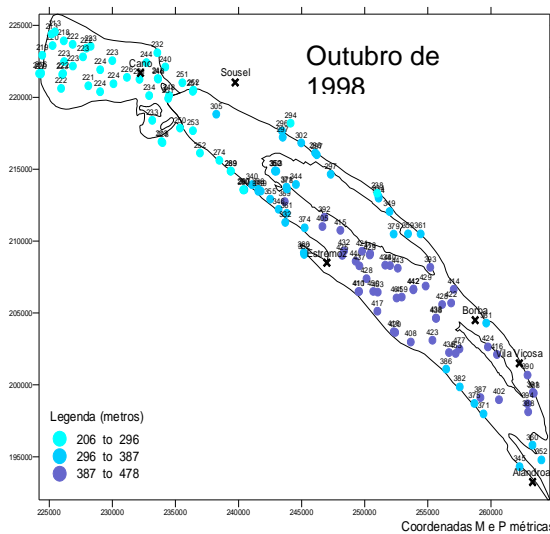
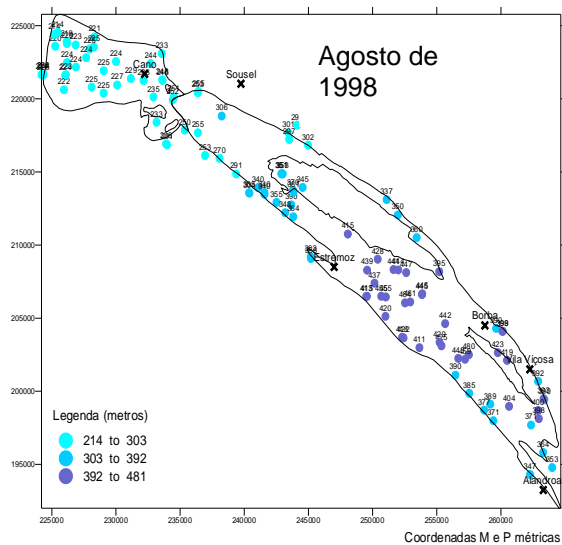


Figura 27 e 28 - Localizações dos pontos de água controlados piezometricamente e nível estático

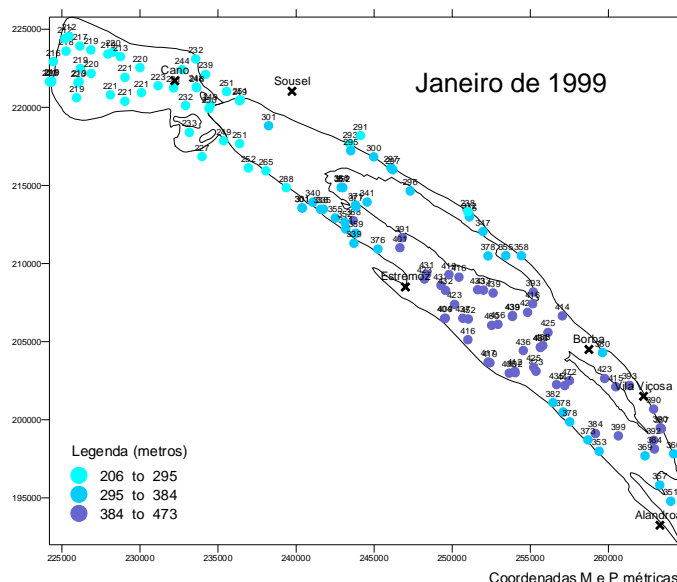


Figura 29 - Localizações dos pontos de água controlados piezometricamente e nível estático

Da análise dos níveis piezométricos das várias campanhas sobre a base cartográfica actualizada (referida no capítulo da geologia) vários aspectos são evidenciados, nomeadamente o controlo litológico e estrutural, a evolução temporal como resposta às variações climáticas e a semelhança de comportamento entre piezómetros. A projecção dos pontos de água demonstra que o controlo litológico sobre os níveis é muito importante verificando-se ressaltos de 10 a 45 m entre pontos que distam 200 a 2000 m e que estão localizados em diferentes litologias. Nesta análise foi possível identificar a existência de níveis suspensos originada pela intercalação dos metavulcanitos.

Dentro da mesma litologia, principalmente nos dolomitos, o nível piezométrico não apresenta grandes ressaltos, a sua variação faz-se de modo gradual dando indicação sobre possíveis sentidos de fluxo.

Verifica-se também que os pontos de água situados na mesma formação litológica apresentam de um modo geral um comportamento temporal semelhante.

Este estudo permite ainda verificar o comportamento das diferentes litologias à recarga. Os mármoreos apresentam variações mais bruscas do nível, o que, não é de estranhar uma vez que estas formações são muitas vezes aflorantes, sem solo de alteração ou coberto vegetal e encontram-se intensamente fracturadas propicias a uma rápida infiltração.

◈ Análise estrutural

A piezometria é uma variável regionalizada (VR) ou seja é uma variável aleatória que se desenvolve no espaço e que possui uma certa estrutura. Por estrutura entende-se uma certa autocorrelação espacial que possa ser avaliada e descrita por uma função de autocorrelação, o semivariograma. Este pode-se definir como o incremento quadrático médio para um vector deslocação, \mathbf{h} , $\rightarrow \gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} \text{var} [\mathbf{Z}(\mathbf{x}+\mathbf{h}) - \mathbf{Z}(\mathbf{x})]$

Onde, \mathbf{Z} representa o valor observado da VR, \mathbf{x} a localização num espaço uni, bi ou tridimensional.

O objectivo da análise estrutural é identificar e caracterizar a estrutura subjacente à VR através de um semivariograma experimental. Na análise do semivariograma há dois aspectos importantes a considerar: o comportamento na origem e o comportamento no infinito. O primeiro é um índice de regularidade e continuidade da variável enquanto que o segundo fornece indicações sobre a sua estacionaridade.

A piezometria é de uma maneira geral uma variável regular e não estacionária, ou seja o semivariograma experimental passa na origem e tende a crescer sem limite segundo um modelo potencial, linear ou outro. Neste caso a variável exibe uma tendência ou deriva.

Outro aspecto a considerar na análise estrutural, é a detecção da eventual presença de anisotropia. Esta manifesta-se pela variação nos parâmetros do variograma ou mesmo na forma deste. A anisotropia é típica das VR com deriva como é o caso da piezometria.

Após a determinação da estrutura da piezometria pretende-se estimar os valores da VR em locais onde não se realizaram observações. Esta estimação é feita por um método designado de krigagem. A krigagem é um método de estimação por interpolação linear, que tem em conta a etapa precedente de determinação da estrutura da variável.

Uma vez que estamos na presença de uma variável não estacionária quer a estimação do semivariograma quer a krigagem oferecem dificuldades especiais.

Para além disto o sistema é composto por formações tão distintas como os calcários lacustres polvulentos do Cano e os calcários cristalinos do paleozoico com comportamentos hidráulicos muito diferentes.

Uma das soluções encontradas para contornar o problema da não estacionaridade da piezometria e assim determinar o semivariograma e estimar os valores VR foi considerar uma krigagem por blocos.

Foram então calculados os variogramas experimentais para as diferentes áreas representadas na **figura 30** e a sua análise feita separadamente, para uma situação de águas altas (Abril de 1998) e outra de águas baixas (Agosto de 1998).

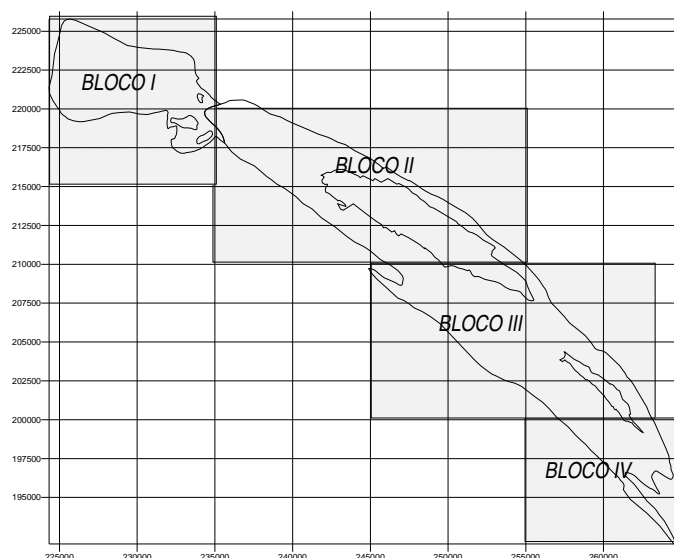
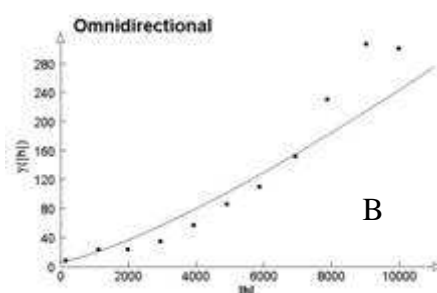
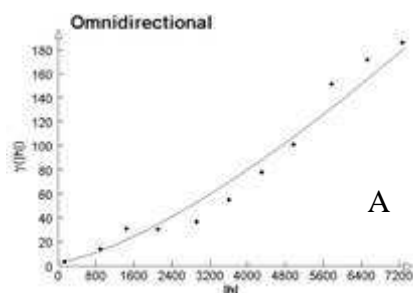


Figura 30 - Divisão do sistema aquífero Estremoz- Cano em blocos para serem tratados do ponto de vista da geoestatística

Bloco I

Neste bloco foram consideradas as medições efectuadas nos calcários do Cano. Os variogramas experimentais em Abril e Agosto de 1998 apresentam as mesmas características.

A análise dos variogramas experimentais (omnidireccionais) permitiu ajustar um modelo de potência com “slope”. Tendo-se ainda verificado um ligeiro efeito de pepita (o semivariograma experimental não passa pela origem). Este efeito poderá resultar do facto do raio de influência da variável ser inferior à distância entre os pontos de observação ou ser devido a erros analíticos, etc.



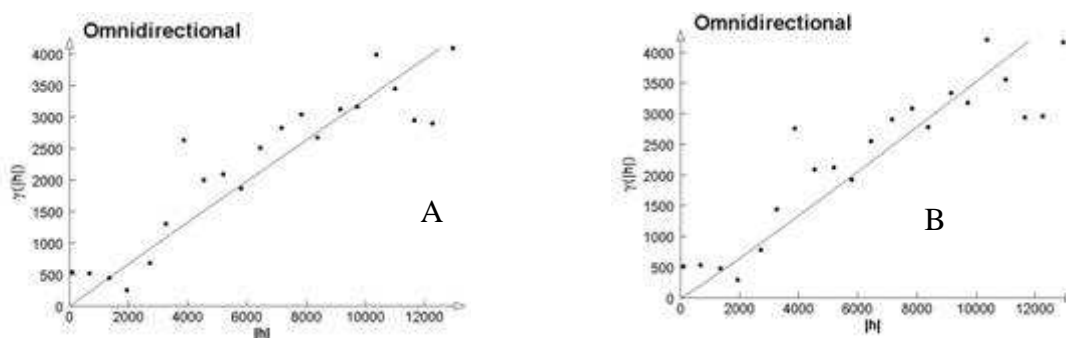
Figuras 31 e 32 - Semivariogramas experimentais da variável piezometria no **Bloco I**, em Abril de 1998 **(A)** e Agosto de 1998 **(B)**

Tabela 12 - Parâmetros estruturais do modelo de potência – BLOCO I

	Potência	Covariância	Slope (metros)
Variograma-Abril /98	1.30	112	0.0018
Variograma-Agosto /98	1.39	116	0.00076

Bloco II

Neste bloco foram consideradas as medições efectuadas nas formações carbonatadas do Paleozoico principalmente dolomitos e xistos do Pré-câmbrio, em 41 pontos. Os variograma experimentais em Abril e Agosto de 1998 são também bastante semelhantes. A análise dos variogramas experimentais (omnidireccionais) permitiu ajustar um modelo de potência com “slope”.



Figuras 33 e 34 - Semivariogramas experimentais da variável piezometria no **Bloco II**, em Abril de 1998 **(A)** e Agosto de 1998 **(B)**

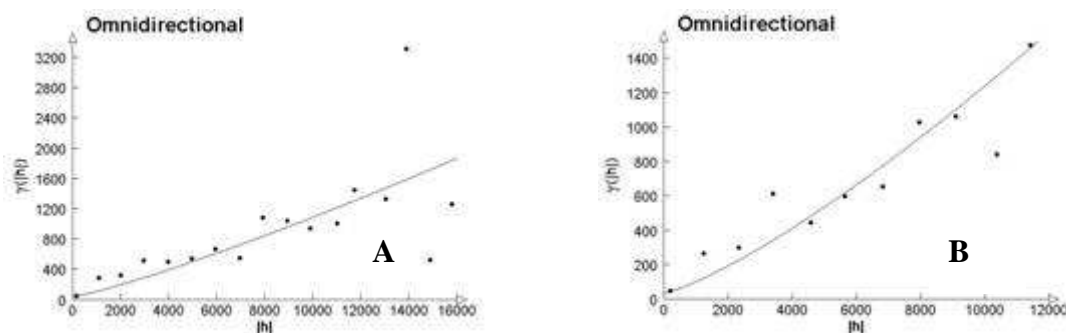
Tabela 13 - Parâmetros estruturais do modelo de potência – BLOCO II

	Potência	Covariância	Slope (metros)
Variograma-Abril /98	0.98	2479	0.396
Variograma-Agosto /98	1.05	2554	0.223

Bloco III

Neste bloco foram consideradas as medições efectuadas nas formações carbonatadas do Paleozóico principalmente dolomitos, em 38 pontos. Os variogramas em Abril e Agosto de 1998 são também bastante semelhantes.

A análise dos variogramas experimentais (omnidireccionais) permitiu ajustar um modelo de potência com “slope”.



Figuras 35 e 36 - Semivariogramas experimentais da variável piezometria no BLOCO III, em Abril de 1998 **(A)** e Agosto de 1998 **(B)**

Tabela 14 - Parâmetros estruturais do modelo de potência – BLOCO III

	Potência	Covariância	Slope (metros)
Variograma-Abril /98	1.18	629	0.02
Variograma-Agosto /98	1.27	635	0.01

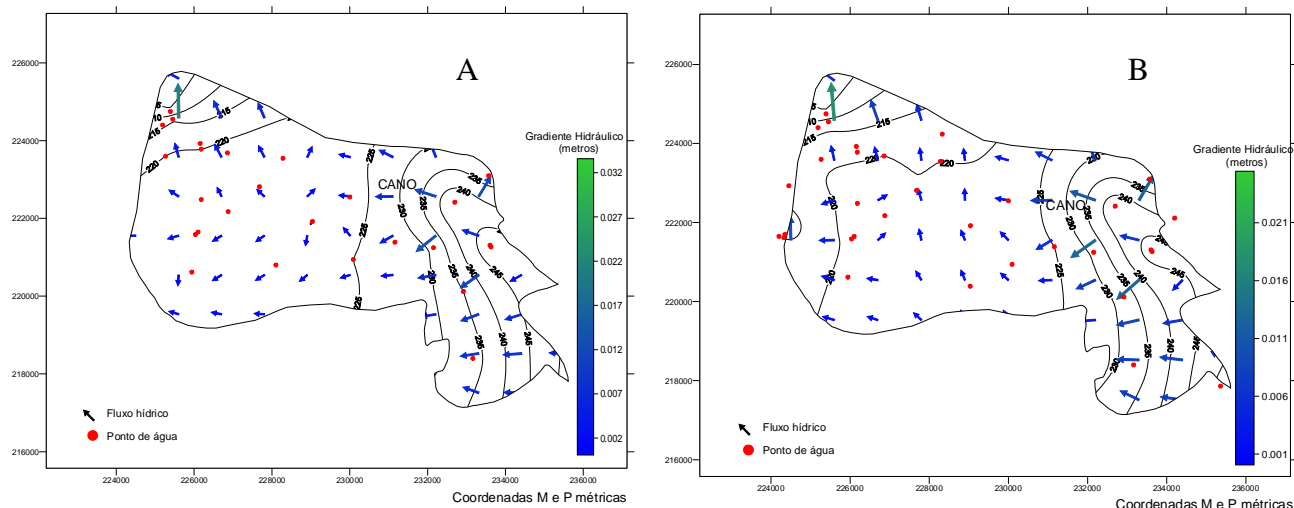
Bloco IV

Neste bloco uma vez que o número de pontos era reduzido, apenas 9, optou-se por não se efectuar análise estrutural, a krigagem seria bastante imprecisa.

Apesar terem sido apresentados apenas os variogramas para as campanhas de Abril e Agosto de 1998 é de referir que os variogramas obtidos nas restantes campanhas apresentam as mesmas características.

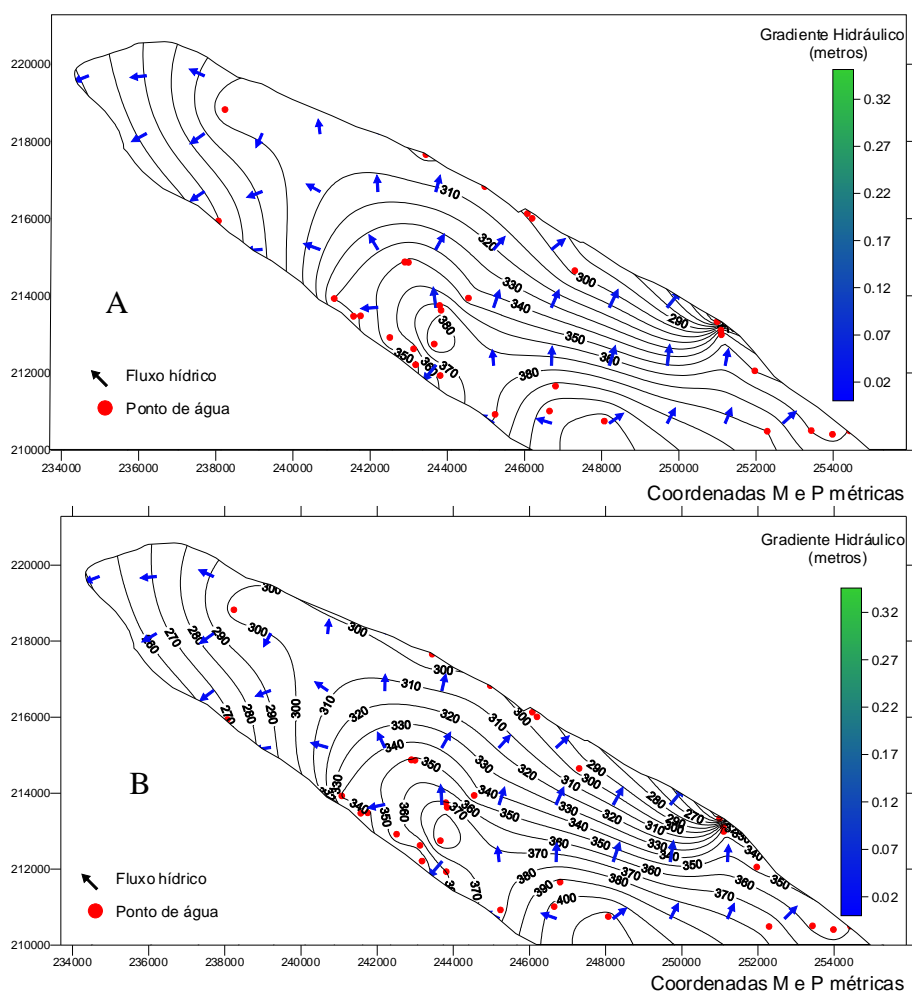
◇ Estimação da variável piezometria

Definido o modelo estrutural realizou-se a estimação por krigagem sobre uma malha de 100 metros e considerando os parâmetros que constam das **tabelas 12 a 14**, obtiveram-se os mapas de isovalores da piezometria para cada bloco, com indicação do gradiente hidráulico.



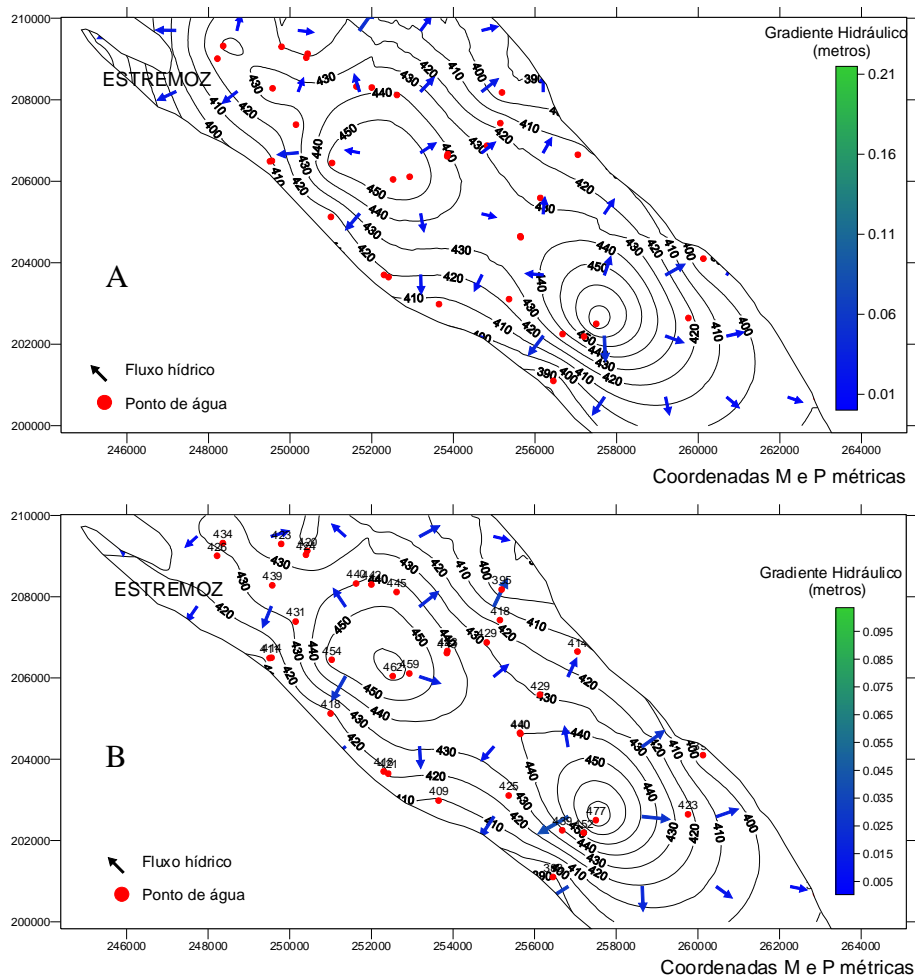
Figuras 37 e 38 - Mapas de isopiezas para o BLOCO I nos meses de Abril **(A)** e Agosto de 1998 **(B)**, obtidos por krigagem do modelo de potência com “slope”

Os mapas de isovalores de piezometria (**figura 37 e 38**) quer para uma situação de águas altas quer de águas baixas indica um gradiente hidráulico entre 0.2% e 1.2%, decrescente para W-NW.



Figuras 39 e 40 - Mapas de isopiezas para o BLOCO II nos meses de Abril **(A)** e Agosto de 1998 **(B)**, obtidos por krigagem do modelo de potência com “slope”

Os mapas de isovalores de piezometria (**figuras 39 e 40**) quer para uma situação de águas altas quer de águas baixas indica um gradiente hidráulico entre 2% e 4.5%, decrescente para NW. Neste bloco a heterogeneidade da distribuição dos pontos medidos faz com que a krigagem seja menos precisa.



Figuras 41 e 42 - Mapas de isopiezas para o BLOCO III nos meses de Abril (**A**) e Agosto de 1998 (**B**), obtidos por krigagem do modelo de potência com “slope”

Os mapas de isovalores de piezometria (**figuras 41 e 42**) quer para uma situação de águas altas quer de águas baixas indica um gradiente hidráulico entre 1% e 6%, decrescente radialmente par os bordos do anticlinal.

◆ Piezometria / Geologia estrutural

Com base no comportamento e distribuição dos níveis piezométricos e na análise estrutural pudemos confirmar hipóteses já levantadas (Costa, 1985 & Midões, 1999) sobre

a tendência geral dos sentidos de fluxo da água subterrânea no sistema aquífero Estremoz-Cano.

Nesta perspectiva o anticlinal pode ser dividido em duas partes. A metade noroeste entre Estremoz e Sousel apresenta uma tendência para os níveis piezométricos diminuírem em direcção ao fecho NW desta estrutura (**figuras 37 e 38**). Esta tendência é particularmente visível no flanco SW onde os níveis diminuem de forma gradual em direcção à região do Cano sem evidenciarem um forte controlo litológico ou estrutural. Este comportamento poderá explicar a origem dos calcários lacustres de idade plistocénica, que constituem a superfície planáltica regular do Cano. Estes terão sido o resultado da precipitação de minerais carbonatados das águas provenientes do anticlinal de Estremoz que teria neste local um ponto de descarga de águas subterrâneas (Costa, 1985).

Nos calcários do Cano esta tendência mantém-se, ou seja o fluxo processa-se de SE para NW, existindo na zona central entre as isopiezas dos 200 e dos 225 m, onde o gradiente é pequeno.

A metade sudeste entre Estremoz e o Alandroal cuja variação dos níveis é mais complexa apresenta na zona centro (**figura 41 e 42**) uma diminuição dos níveis para os bordos da estrutura de forma mais ou menos radial.

Esta zona específica do anticlinal foi analisada em pormenor com base numa campanha realizada pelo IGM onde foram efectuadas 86 medições do nível estático em furos e poços, com o objectivo de tentar esclarecer melhor a variação dos níveis numa zona onde esta é especialmente complexa, na depressão axial existente imediatamente a NW de Borba (**figura 43**). Na figura seguinte está representada a localização dos furos e poços, o nível piezométrico medido e ainda as nascentes controladas durante um ano no que se refere ao seu caudal e parâmetros físico-químicos de campo, por forma a complementar este estudo.

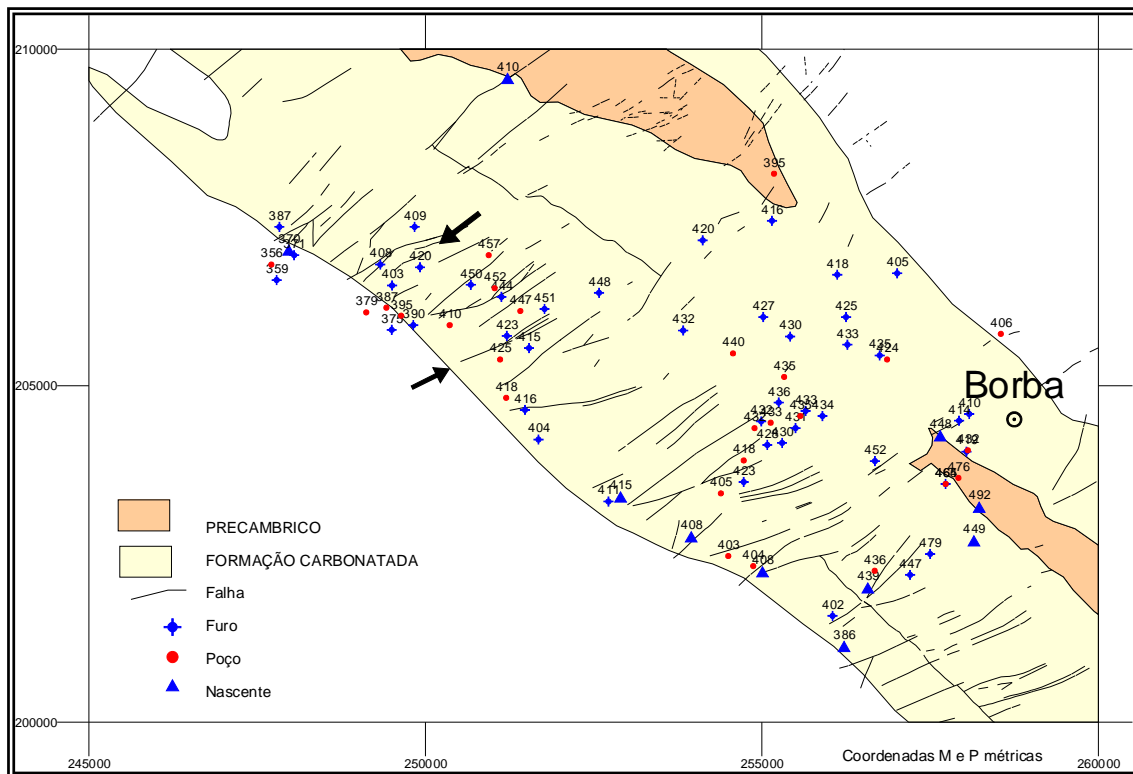


Figura 43 - Localização dos pontos de água medidos em Abril de 1999 e respectivo nível piezométrico

Os dados de piezometria foram conjugados com o estudo de geologia estrutural realizado pelo Lirio, permitindo tirar algumas ilações sobre o funcionamento hidráulico desta zona.

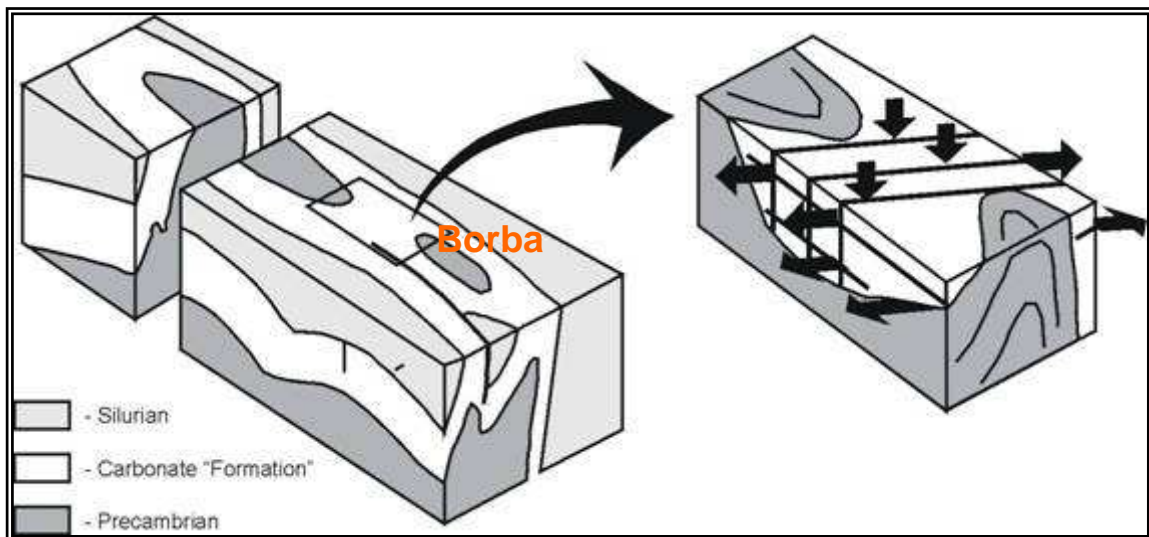


Figura 44 - Bloco diagrama do anticlinal de Estremoz (Dias, *in prep.*)

Esta zona (NW de Borba, **figura 43**) constitui uma extensa área onde aflora a Formação Carbonatada e que por isso se apresenta como um lugar privilegiado para a recarga do aquífero. No entanto, como a geometria do anticlinal tem aqui a forma de uma sela, o

Precâmbrico encontra-se a pequena profundidade, a água é impedida de penetrar a grandes profundidades, escoando de forma a aproveitar a geometria. Sendo assim a água é obrigada a dispersar-se, quer para o flanco NE quer para o flanco SW, situação bem visível no mapa com as direcções de fluxo (**figura 45**). Os canais que vão favorecer esta dispersão são de três tipos: fracturas NE-SW, fracturas sub - horizontais e o próprio contacto entre os carbonatos e o Pré-câmbrico. Esta situação faz com que se verifique um maior número de nascentes nesta zona do que no resto do anticlinal. De referir ainda que as nascentes que se localizam junto ao contacto com os xistos do Silúrico são mais caudalosas do que as nascentes resultantes do contacto entre os xistos do Pré-câmbrico e a formação dolomítica.

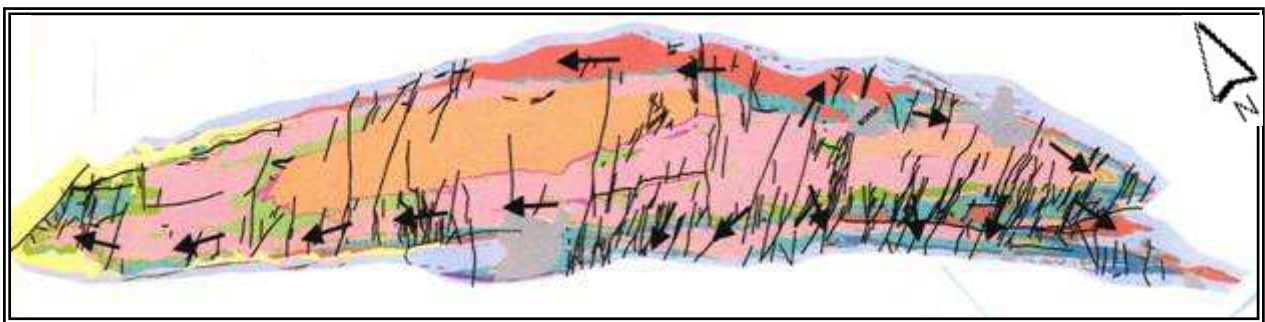


Figura 45 - Representação esquemática das direcções preferenciais do sentido de fluxo da água subterrânea no anticlinal de Estremoz (*in* Midões, 1999)

Da análise da piezometria podemos verificar que:

- De uma maneira geral os níveis medidos nos poços são mais elevados, uma vez que os poços são menos profundos, captando apenas os níveis mais superficiais.
- Algumas das falhas com orientação NW-SE parecem comportar-se como barreira impermeável, uma vez que os níveis medidos de um e outro lado destas estruturas apresentam diferenças de 30 a 70 metros.
- A água circula preferencialmente pelas fracturas com orientação NE-SW. Disto é prova os depósitos quaternários de origem semelhante à dos calcários do Cano que se encontram associados a estas falhas denunciando a existência de circulação subterrânea “antiga” e descarga do sistema. No entanto algumas destas fracturas parecem constituir barreiras hidráulicas (fractura assinalada → na **figura 43**) isolando sectores com diferente valor do nível piezométrico.

◈ Influência da indústria extractiva nos níveis piezométricos

Associado às características intrínsecas destas formações, convém lembrar a importância da actividade de extracção de rocha ornamental, uma vez que esta é responsável pela abertura de grandes “crateras”, colocando em contacto directo o meio subaéreo com o subterrâneo.

A exploração de rocha ornamental constitui uma actividade de natureza antrópica, responsável por variações importantes do nível piezométrico, nomeadamente em dois aspectos:

- potenciação da evaporação directa, por aumento das superfícies freáticas a descoberto no caso das pedreiras abandonadas/inactivas;
- bombagem intensa e contínua dos furos existentes na área de

As pedreiras abandonadas ou seja aquelas onde a qualidade da rocha é menor e que por isso não são exploradas, constituem autênticas “lagoas” com o nível freático muito próximo da superfície, em média a 2 metros da cota da superfície do terreno.

Por sua vez as pedreiras em exploração, algumas com várias dezenas de metros de profundidade, estão secas, porque existe uma bombagem intensa e contínua de água para fora da pedreira de modo a poderem ocorrer os trabalhos de extracção.

Toda esta movimentação de água subterrânea vai originar grandes alterações na superfície piezométrica local e com certeza nos sentidos de fluxo. Os efeitos secundários associados à extracção têm sido sentidos em furos que se localizam perto de zonas de pedreiras, com o rebaixamento do seu nível ou com o completo desaparecimento de água e em nascentes onde os seus caudais diminuem drasticamente ou secam.

Perante os factos apresentados, é muito complicado determinar o nível estático das captações que se localizam na terminação SE do anticlinal onde a exploração de rocha ornamental é mais intensa. Sendo assim, nesta zona, apesar das medições dos níveis efectuadas indicarem que o sentido de fluxo da água subterrânea se processa de NW→SE, não é possível ignorar a grande influencia da indústria extractiva e ter algumas reservas em relação ao sentido de fluxo determinado.

Esta actividade constitui, portanto, uma condicionante espacial e temporal dos níveis piezométricos.

6.3 - Nascentes

As nascentes correspondem a descargas naturais do sistema aquífero que resultam da intercepção do nível piezométrico regional ou local com a superfície topográfica. Estas constituem pontos óptimos de avaliação das características das águas subterrâneas e do comportamento do sistema aquífero.

Tal como já foi referido no capítulo sobre a piezometria as nascentes no anticlinal de Estremoz estão principalmente relacionadas com o contacto entre as formações carbonatadas e as formações impermeáveis (xistos), podendo também ocorrer associadas a zonas fracturadas e/ou carsíficas onde surgem sobre a forma de algares.

Como se pode observar na **figura 46** elas distribuem-se preferencialmente junto ao contacto entre os calcários e os xistos quer os envoltentes quer os do núcleo.

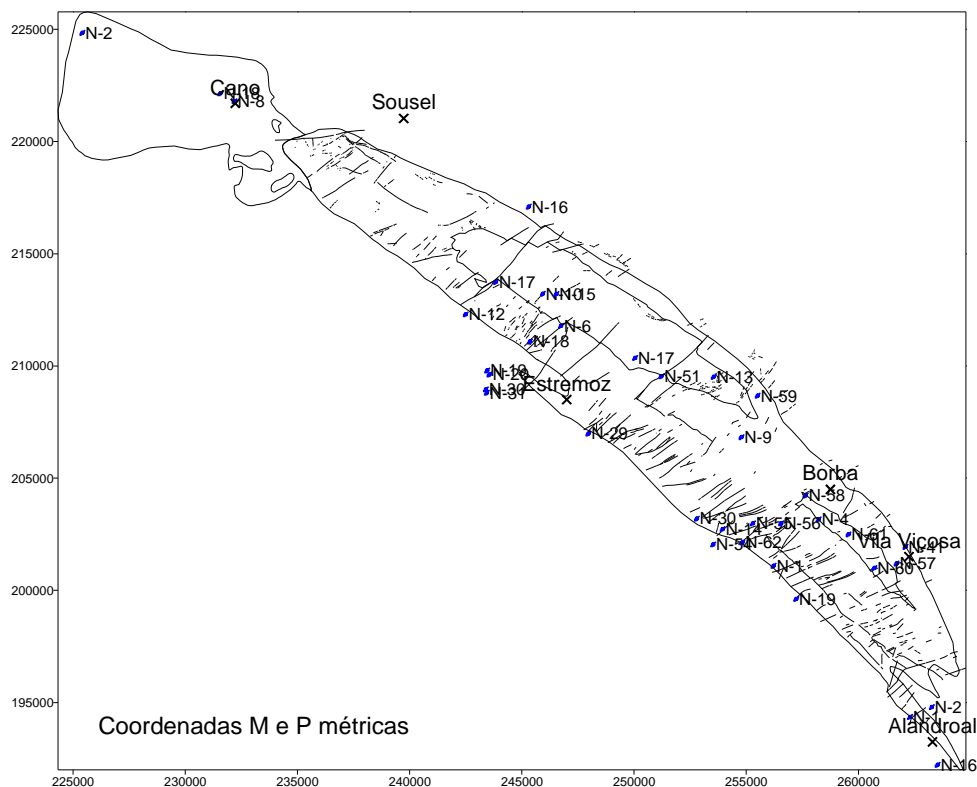


Figura 46 - Localização das nascentes monitorizadas entre Setembro 1998 e Agosto 1999

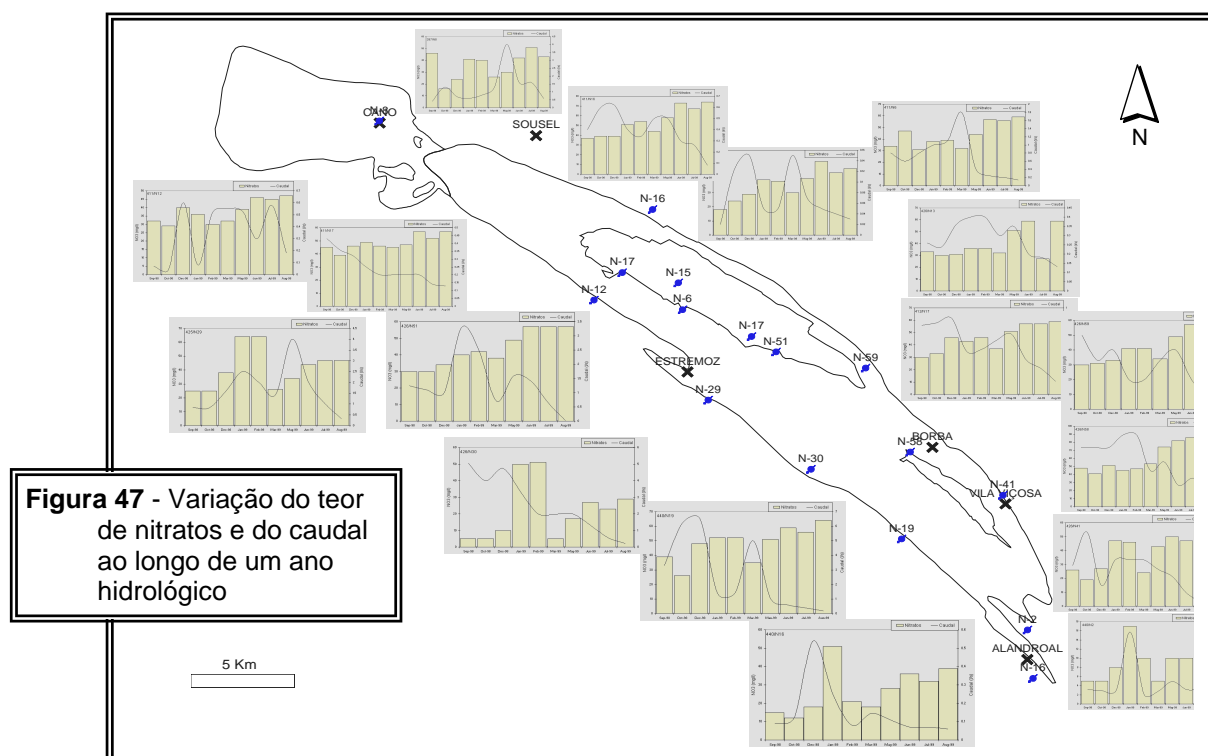
As nascentes localizam-se preferencialmente no flanco SW da metade SE do anticlinal apresentando depósitos cenozóicos associados, o que denota a existência de uma circulação subterrânea “antiga” relacionada com o sistema de fracturas que atravessam o anticlinal com a mesma orientação.

Com o objectivo de analisar a resposta do sistema às variações climáticas e monitorizar a evolução do teor em nitratos na água subterrânea procedeu-se ao controlo de parâmetros físico-químicos e do caudal em nascentes distribuídas ao longo do anticlinal e na planície de Cano. Foram realizadas 10 campanhas que decorreram entre os meses de Setembro de 1998 e Agosto de 1999. Nestas campanhas foram monitorizados os seguintes parâmetros: temperatura, condutividade, pH, teor em nitratos e caudal debitado.

A resposta das nascentes à precipitação foi analisada nas nascentes que se localizavam perto das estações udométricas de Sousel, Estremoz, Vila Viçosa e Alandroal tendo-se verificado que de uma maneira geral a resposta é imediata, ou seja após um período de precipitação o caudal das nascentes aumenta. O caudal destas nascentes além de depender da precipitação é fortemente influenciado pelas extracções que se verificam na região.

Na **figura 47** está representada, a título exemplificativo, a variação do teor de nitratos e a variação do caudal ao longo de um ano hidrológico apenas para 16 das nascentes controladas.

Os dados referentes às 26 nascentes foram tratados estando os estatísticos referentes ao caudal e teor de nitratos representados nas box plots.



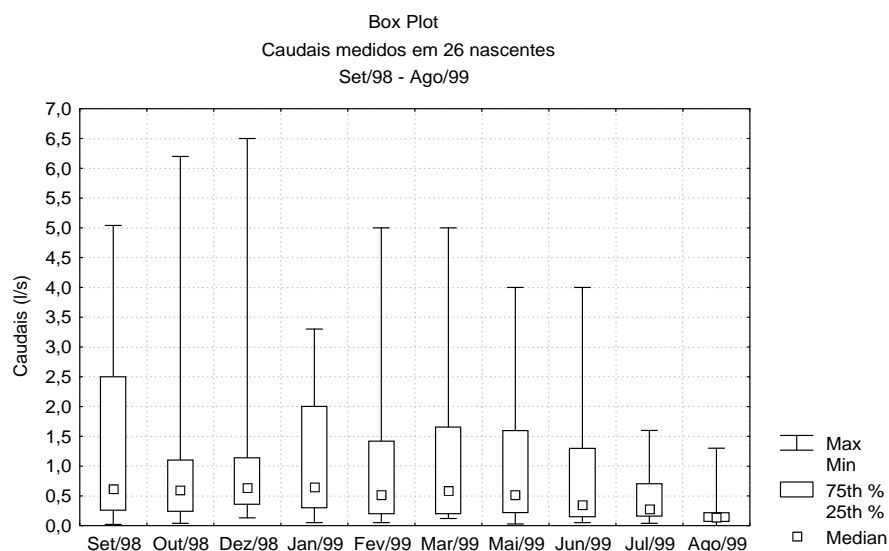


Figura 48 – Principais estatísticos e características das campanhas de monitorização das nascentes no que se refere ao caudal

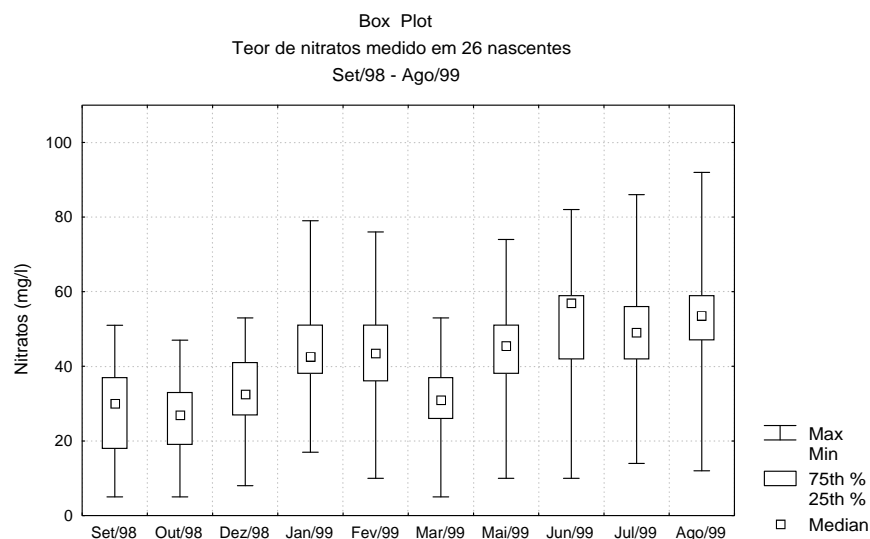


Figura 49 – Principais estatísticos e características das campanhas de monitorização das nascentes no que se refere ao teor de nitratos