

APLICAÇÃO DE UMA TÉCNICA MISTA DE ANÁLISE EM COMPONENTES PRINCIPAIS E VARIOGRAFIA À CLASSIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE PIEZÓMETROS

Ana Cristina BUXO¹; Luís RIBEIRO²

RESUMO

A monitorização dos sistemas aquíferos em geral e em particular daqueles sujeitos a fortes pressões externas, muitas vezes decorrentes da actividade humana, implica a utilização de técnicas que permitam identificar quais as principais características do sistema.

A aplicação de técnicas de análise de dados à monitorização piezométrica, pode ser usada como um meio expedito para comparar grandes volumes de dados, embora teoricamente, estas técnicas apresentem a desvantagem de serem incapazes de incorporar o conhecimento empírico que o hidrogeólogo possui sobre o aquífero.

Uma das limitações à aplicação corrente desta técnicas é o facto de, na maioria das redes de monitorização, as séries temporais dos piezómetros não se apresentarem contínuas e simultâneas entre os vários pontos.

Aplicou-se assim em alternativa, uma técnica de análise de dados em que se substitui a informação das séries temporais pelos variogramas temporais, sendo que esta medida geoestatística tem como vantagem o facto de ser uma síntese dos vários factores que actuam sobre o sistema.

Palavras-chave: Sistemas Aquíferos, Monitorização, Séries Piezométricas, Análise em Componentes Principais (ACP), Variografia.

1 - INTRODUÇÃO

¹ Geóloga, CVRM / Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa - Portugal

² Prof. Auxiliar, CVRM / Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa - Portugal

A informação piezométrica, pela sua natureza é capaz de fornecer várias imagens sobre o comportamento de um aquífero ou sistema aquífero. Mais frequentemente a análise faz-se através da obtenção de modelos da superfície piezométrica, aplicando métodos de estimação ou outros, a partir das medições pontuais efectuadas nos diversos piezómetros disponíveis.

Contudo esta informação também pode ser trabalhada do ponto de vista da sua evolução temporal, através do estudo, individual ou conjunto, das séries temporais dos diferentes piezómetros.

Um outro aspecto muito importante a ter em conta na análise do aquífero ou sistema aquífero é a sua interacção com os vários sistemas externos, naturais ou antropogénicos, que influenciam a sua evolução. Nesse sentido foi objectivo deste trabalho analisar a interacção de um sistema aquífero com factores como a pluviosidade ou a rede de drenagem superficial, além do potencial impacte gerado pela presença de uma exploração mineira em profundidade.

Contudo, há que ter em conta que diferentes fenómenos poderão ter efeitos similares sobre a piezometria. Por exemplo, num piezómetro onde se verifique uma tendência continuada para a descida do nível piezométrico, este efeito poderá ser devido quer à drenagem profunda provocada pelos ocos mineiros como poderá também resultar da progressiva diminuição da quantidade de água da chuva disponível para recarga dos aquíferos, em resultado do período de seca que afectou a região.

Por fim há igualmente que considerar a natureza do sistema aquífero estudado e em particular da sua unidade mais profunda, correspondente a um aquífero com característica de fracturado ou fissurado, resultante da presença de uma microfissuração generalizada e localmente densa, mas muito heterogénea. Há assim interesse em determinar a possibilidade de existir um padrão espacial particular, nomeadamente zonas onde se verifiquem variações bruscas do nível piezométrico num raio de poucos metros em oposição a blocos mais ou menos homogéneos onde o comportamento dos piezómetros seja mais ou menos similar.

2 - A REDE DE OBSERVAÇÃO PIEZOMÉTRICA

Na área de estudo considerada (Área Mineira de Neves Corvo) existe um sistema aquífero complexo constituído por três sub-sistemas em conexão hidráulica entre si. As características destes sub-sistemas são as seguintes:

Sub-Sistema Superficial ou Epidérmico

Também designado por Sub-Sistema Cutâneo, comporta-se como um aquífero/aquitardo relativamente heterogéneo de carácter livre a semi-confinado, correspondente à camada superficial de rochas meteorizadas, associadas a uma faixa de fissuração superficial resultante da descompressão dos materiais rochosos, em particular os de natureza mais competente. Pela sua génese esta faixa de materiais alterados terá espessuras pouco significativas até porque as fissuras tendem a fechar para a profundidade, diminuindo a permeabilidade do meio.

Sub-Sistema Intermédio ou Hipodérmico

Localizado abaixo do sistema cutâneo è também designado por Sistema Complexo e é formado pelo conjunto de falhas sub-verticais que atravessam a sequência litoestratigráfica desde a superfície até grandes profundidades. Esta zona classifica-se como um aquífugo, comportando-se essencialmente como uma zona de transferência de água entre os sistemas supra e subjacentes, sendo o sentido dessa transferência determinado em cada altura pelas diferenças de potencial desses sistemas.

Sub-Sistema Profundo

È o mais profundo dos sistemas identificados. Corresponde a um aquífero que na situação anterior ao desenvolvimento dos trabalhos mineiro seria confinado, resultante da presença de uma microfissuração bem disseminada, centimétrica a decimétrica.

Este sistema encontrava-se inicialmente numa situação de equilíbrio dinâmico, com comunicação hidráulica entre estes três níveis, em que o sentido do fluxo vertical dependia essencialmente da relação deste sistema aquífero com as variáveis climáticas, em particular a pluviosidade e com a rede de drenagem superficial. Posteriormente, foi implantada na zona uma exploração mineira que em profundidade veio alterar o esquema de circulação existente, através da criação de ocos que se localizam fundamentalmente ao nível do sub-sistema profundo.

Com o objectivo de estudar a evolução deste sistema aquífero e em particular do impacte da exploração mineira no sub-sistema profundo, foi analisada a evolução da superfície piezométrica ao longo de um período de 12 anos. A rede de observações piezométrica cobre uma área de cerca de 5 Km² e é constituída por cerca de 200 piezómetros para os quais existe um total de quase 5200 medições efectuadas ao longo de um período de 12 anos.

Apesar da aparente densidade e riqueza de dados, estes não podem contudo ser analisados e/ou comparados directamente devido à natureza da rede piezométrica. Assim, há que considerar os seguintes factores:

- No conjunto dos piezómetros referidos anteriormente, distinguem-se dois grupos principais: um formado por poços de pequena profundidade, designados por ante-poços e outro formado por poços que teoricamente atravessam todo o sistema aquífero, designados por sondagens profundos;
- A profundidade dos piezómetros não se manteve constante ao longo do tempo visto que alguns ante-poços foram posteriormente aprofundados;
- A configuração da rede de observação piezométrica é muito variável ao longo do tempo devido à constante construção de novos piezómetros ou abandono de outros, geralmente devido à degradação e colapso das paredes dos poços; Na verdade, do total de 200 piezómetros referidos anteriormente, apenas 6 têm medições regulares ao longo de todo o período considerado;
- A periodicidade de amostragem foi relativamente inconstante durante os primeiros quatro anos de medições, mas a partir dessa data passou a ser realizada mensalmente. Contudo, analisando individualmente cada piezómetro é frequente encontrar séries relativamente descontínuas.

A importância da monitorização deste sistema aquífero prende-se com questões de natureza diversa, nomeadamente questões de âmbito hidrogeológico e ambiental como sejam o

impacte da exploração mineira na quantidade e qualidade das reservas aquíferas mas também questões de ordem técnica relacionadas com a prevenção de formação de águas ácidas, o dimensionamento de equipamentos de bombagem e a construção e dimensionamento de barragens de armazenamento das águas extraídas.

3 - METODOLOGIA APLICADA

De uma forma genérica, quando se pretende estudar um dado fenómeno natural e as interacções entre os factores intervenientes, existem algumas técnicas que podem ser aplicadas nessa análise. No entanto, há que ter em conta que os fenómenos naturais não são fáceis de apreender na sua totalidade e quando muito apenas sabemos que esse fenómeno é resultante de um vasto número de variáveis, sem que no entanto seja possível enumerá-las a todas.

Por sua vez, esta diversidade é difícil de analisar directamente, pelo que se recorre à aplicação de técnicas de análise multivariada de dados cuja principal função é descrever e analisar as relações entre as várias variáveis que intervêm num determinado fenómeno. De entre estes métodos existe um conjunto de técnicas genericamente designadas por Análise Factorial que podem ser aplicadas para a determinação de graus de semelhança/diferença entre amostras e/ou entre propriedades (variáveis).

Isto implica a organização dos dados sob a forma de matrizes em que as n linhas corresponde às várias amostras ou observações e as p colunas correspondem às diversas variáveis consideradas na descrição do fenómeno. Este conjunto de dados também pode ser descrito em termos geométricos, como a projecção de um conjunto de n vectores, correspondentes às amostras, num espaço pluridimensional, com tantas dimensões p quanto o número de variáveis consideradas na análise. Para a grande maioria dos casos será assim de esperar que, quer em termos de matriz de dados, quer mesmo em termos geométricos, este conjunto de dados seja demasiado vasto para se extraírem directamente, conclusões sobre as interacções existentes.

A Análise Factorial baseia-se na aplicação dos conceitos de Valores Próprios e Vectores Próprios (*eigenvalues* e *eigenvectors*), extraídos a partir de uma matriz quadrada resultante da multiplicação da matriz de dados (ou uma sua transformada) pela sua transposta (DAVIS, 1986), dando origem a um novo espaço (factorial), onde se projectam as amostras e/ou as propriedades. A utilização dos conceitos de valores e vectores próprios, pelas suas características, permitem criar um novo sistemas de eixos em que a sua importância diminui à medida que aumenta a sua ordem de extracção. Logo é possível reduzir o espaço de análise para um espaço factorial bi- ou tri-dimensional, obtendo assim uma melhor percepção das relações existente.

A Análise em Componentes Principais (ACP), é um tipo de análise factorial que aplica o cálculo dos valores e vectores próprios a partir da matriz da variância/covariância ou da matriz dos coeficientes de correlação entre as variáveis.

Na fase inicial do trabalho a primeira hipótese para a aplicação da ACP foi sobre as séries piezométricas medidas em vários pontos (ver figura 1), considerando uma matriz de

dados cujas n linhas corresponderiam aos piezómetros e as p colunas corresponderiam às diversas datas em que foram efectuadas medições (ver Quadro 1). Esta matriz teria assim uma estrutura análoga à representação gráfica de um conjunto de séries piezométricas:

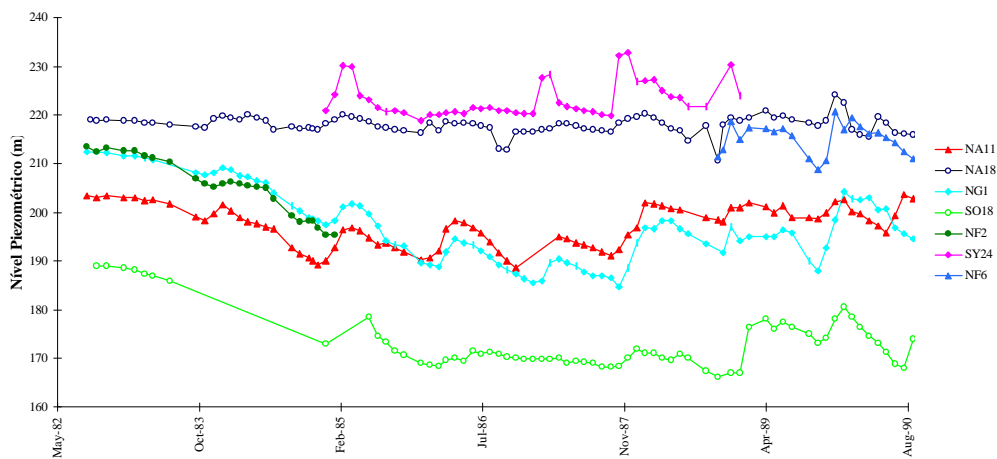


Figura 1 - Séries piezométricas

Quadro 1

Exemplo da matriz de dados aplicada à análise das séries piezométricas, em que as n linhas correspondem aos vários piezómetros existente na rede de observação e as p colunas correspondem às diferentes datas em que foram obtidas medições.

		D a t a s							
		dd/mm/aa	dd/mm/aa	dd/mm/aa	dd/mm/aa	dd/mm/aa
P i e z ó m e t r o s	NA11								
	NA16								
	NA18								
	...								
	...								
	...								
	...								
	...								
	...								
	...								
...									

Contudo, dado a grande variabilidade da configuração da rede de observação piezométrica, em que vários piezómetros foram sendo incluídos ou excluídos do conjunto de pontos monitorizados, o facto de as séries piezométricas apresentarem lacunas e a não simultaneidade das séries piezométricas, levou a verificar que uma matriz de dados com esta estrutura não era de todo viável.

Esta situação pode mesmo ser considerada o caso mais normal quando se analisam conjuntamente as séries temporais de vários pontos de uma rede de monitorização, o que explica também porque na maioria das vezes se optam por métodos de análise empíricos por forma a suprir as dificuldades de obtenção de registos contínuos e simultâneos de valores.

Foi assim decidido aplicar a ACP a um novo conjunto de dados resultante da aplicação de uma análise variográfica das séries temporais de cada piezómetro.

Sendo o variograma uma medida da variabilidade espacial ou temporal entre as amostras, esta medida geoestatística é capaz de identificar as estruturas inerentes à variável, caracterizando assim o seu comportamento. O variograma experimental (calculado a partir das amostras) é dado pela expressão:

$$g^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_{(x_{i+h})} - Z_{(x_i)}]^2 \quad (1)$$

em que:

$N(h)$ é o número total de pares de pontos separados por uma distância h

$Z_{(x_i)}$ é o valor da variável observada no ponto x_i

$Z_{(x_{i+h})}$ é o valor da variável observada a uma distância h de x_i

Para o caso dos variogramas temporais, a distância considerada é obtida em unidades de tempo.

A interpretação do variograma é feita em função da sua forma, do seu comportamento junto à origem (que define o efeito de pepita) e do seu comportamento para grandes distâncias. A metodologia de comparação dos variogramas temporais dos vários piezómetros parte do pressuposto que configurações semelhantes dos variogramas traduzem comportamentos semelhantes, resultantes dos mesmos factores.

Considerando que a periodicidade média mensal das medições, foi calculado o variograma experimental para cada piezómetro para uma série de classes temporais, com um passo médio de 30 dias, definidas genericamente por $(h \times 30)$, com $h=1,2,3,\dots,n$. Por uma questão de simplificação e fiabilidade da análise, foram apenas considerados os piezómetros para os quais fosse possível o cálculo do variograma até uma distância de pelo menos quatro anos, ou seja, do total inicial de 200 piezómetros apenas foram considerados 52. De qualquer forma, a maioria dos piezómetros não analisados apresentavam um número escasso de medições ou séries muito descontínuas.

Com os dados dos variogramas temporais (ver figura 2) obtém-se uma nova matriz de dados sobre a qual se vai aplicar a ACP. Neste matriz (ver Quadro 2) as n linhas representam os piezómetros e as p colunas correspondem aos valores do variograma temporal para as várias classes de tempo.

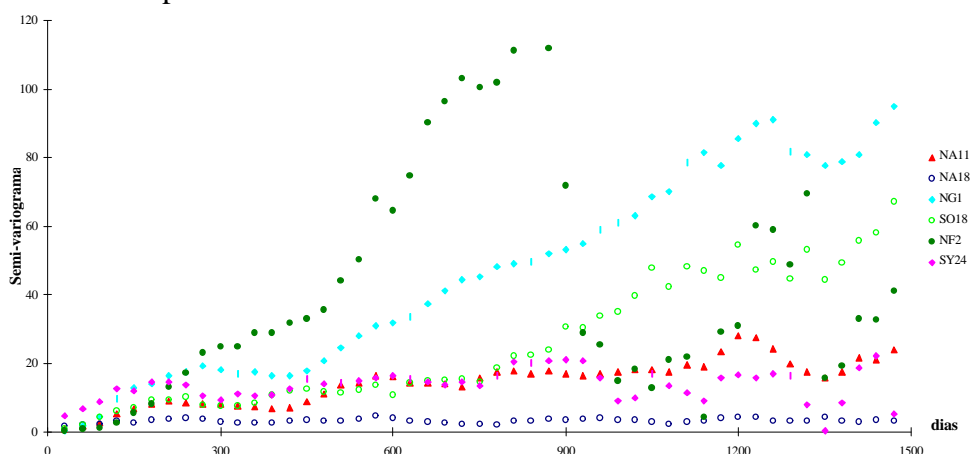


Figura 2 - Variogramas temporais de piezometria

Quadro 2

Matriz de dados para aplicação da Análise em Componentes Principais, em que as n linhas correspondem aos piezómetros e as p colunas correspondem aos valores do variograma temporal para diferentes classes de distâncias.

		Classes de Tempo							
		30 d	60 d	90 d	120 d	1470 d
P i e z ó m e t r o s	NA11								
	NA16								
	NA18								
	...								
	...								
	...								
	...								
	...								
	SX2								
	SX20								
	SY24								

4 - RESULTADOS DA ACP SOBRE A MATRIZ DOS VARIOGRAMAS TEMPORAIS

O cálculo da ACP sobre a matriz dos variogramas temporais dá origem à definição de um espaço factorial onde se vão projectar os piezómetros. O objectivo é verificar se neste espaço mais simplificado, ressaltam padrões de associação de piezómetros com comportamento similares.

Em termos de significância desta análise verifica-se que a inércia associada aos três primeiros eixos factoriais é respectivamente, 71.5% para o Eixo 1, 13.2% para o Eixo 2 e 4.9% para o Eixo 3, ou seja, na totalidade estes três eixos explicam quase 90% de todas as inter-relações entre as entidades. Isso também indica que há uma boa discriminação entre piezómetros.

No gráfico da figura 3, que representa a projecção do diferentes piezómetros sobre o 1º Plano Factorial, é possível estabelecer a separação entre alguns grupos distintos de piezómetros.

Assim, verifica-se que a discriminação dos piezómetros se faz principalmente ao longo do 1º Eixo. De uma forma geral os piezómetros separam-se em dois grupos que se projectam respectivamente na parte positiva do 1º Eixo factorial e na parte negativa deste eixo. A diferenciação dos piezómetros em função do 2º Eixo não é, aparentemente, tão significativa.

Quando se observam os variogramas temporais deste dois grupos, verifica-se que a diferença básica entre eles reside no facto de o conjunto de 8 piezómetros projectados no semi-eixo positivo apresentarem um comportamento, que dentro dos limites temporais considerados, é não estacionário, ou seja, apresentam um crescimento constante da função variograma. Quando se analisam as série piezométricas, verifica-se que são casos em que ocorreram descidas bruscas do nível piezométrico sem que tenha havido posterior recuperação.

Relativamente aos piezómetros projectados no semi-eixo negativo têm um comportamento que, apesar de poder ser classificado como estacionário, apresenta-se mais heterogéneo e portanto mais difícil de interpretar. A dificuldade de caracterização deste grupo

aumenta ainda mais quando se analisam as séries piezométricas, porque existem configurações muito diversas.

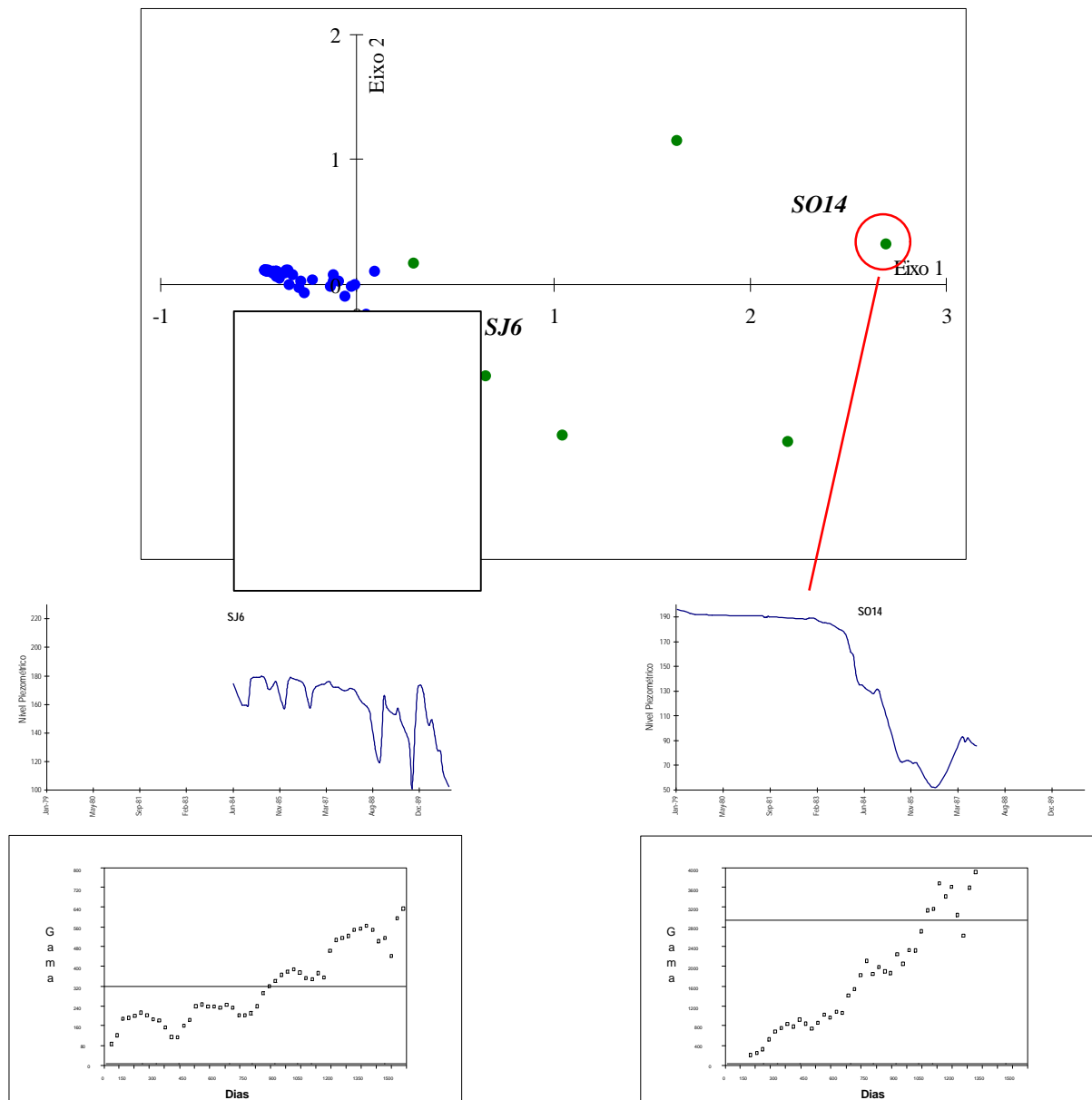


Figura 3 - Resultados da análise em componentes principais (ACP) sobre os variogramas temporais das séries piezométricas. Observa-se uma discriminação dos piezômetros em função da sua projecção sobre o 1º Eixo Factorial, com uma separação gradual entre piezômetros onde predomina uma tendência para a não estacionariedade e os piezômetros com comportamento estacionário.

No prosseguimento do trabalho decidiu-se analisar mais detalhadamente o comportamento dos piezômetros cujos variogramas apresentavam comportamento tendencialmente estacionário. Para esse efeito refez-se a matriz dos variogramas temporais, excluindo agora aquele conjunto de oito piezômetros que se apresentavam perfeitamente diferenciados na primeira ACP.

O resultado desta segunda análise (ver figura 4), para um grupo mais restrito de piezómetros veio efectivamente confirmar que estes apresentarem variogramas cujo comportamento é estacionário, ou seja, os valores do variograma, a partir de uma distância designada amplitude, tendem a estabilizar em torno de um patamar. A distância a partir do qual essa estabilização se verifica corresponde à distância máxima a que as amostras estão correlacionadas.

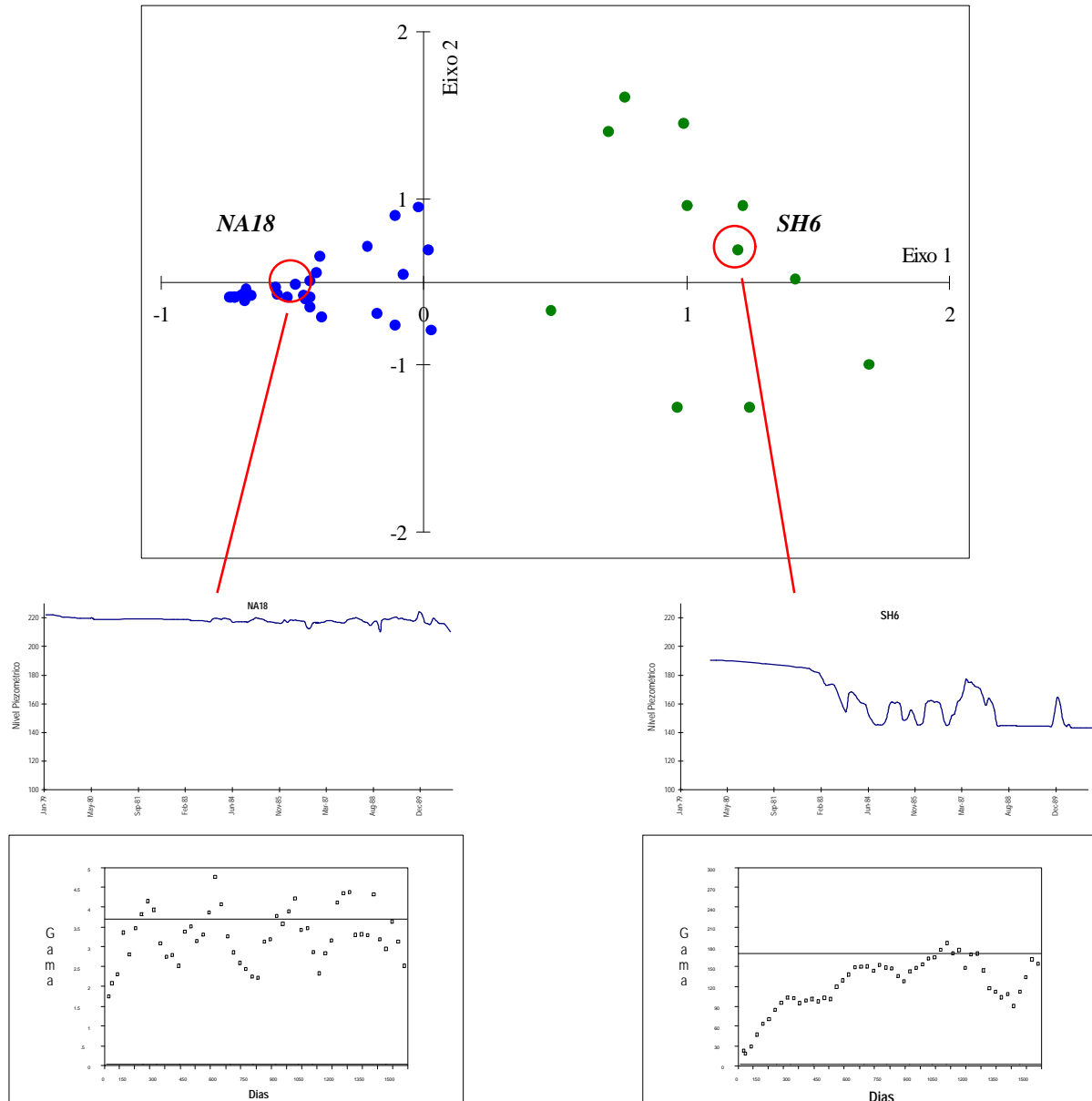


Figura 4 - Resultados da análise em componentes principais (ACP) sobre os variogramas temporais sobre um grupo mais restrito de piezómetros, seleccionados da análise anterior, todos com comportamento predominantemente estacionário, mas que reflectem fenómenos com diferentes escalas temporais.

Nesta segunda ACP é possível distinguir piezómetros que reflectem eventos de diferentes escalas temporais, ou seja a distinção é essencialmente feita com base na amplitude do variograma. Assim os piezómetros projectados no 1º semi-eixo negativo representam variogramas em que a amplitude da estrutura é relativamente pequena, na ordem dos 300 a 400 dias. Em muitos deles observa-se ainda a ocorrência de estruturas periódicas (repetição do mesmo padrão). Estas características são indicadores da presença de um efeito cíclico, que pela amplitude das estruturas parece corresponder ao efeito sazonal da precipitação.

Quanto aos piezómetros projectados no 1º semi-eixo positivo apresentam variogramas mais complexos, ora representados por estruturas de grande amplitude temporal, noutros casos por estruturas imbricadas. Neste grupo é mais difícil identificar o fenómeno predominante, tanto podendo corresponder a um efeito de grande escala como um ciclo de seca ou ainda a um efeito somado de uma descarga suave induzida pelos trabalhos mineiros, parcialmente recuperada pela precipitação.

5 - CONCLUSÃO

Este tipo de análise sobre os variogramas temporais é apenas um dos muitos pontos de partida para a análise do comportamento da piezometria e conseqüentemente do próprio aquífero em si.

Em primeiro lugar há que distinguir este tipo de abordagem de outras metodologias mais correntes, de cariz mais empírico, e saber quais as vantagens e desvantagens de cada metodologia.

Na verdade, alguns dos resultados apresentados poderiam ter sido obtidos de formas mais directas. Por exemplo, para avaliar a influência da pluviosidade sobre a série piezométrica de cada piezómetro, poderíamos ter aplicado o cálculo do coeficiente de correlação entre ambas as séries, até porque como a área de estudo não é muito grande, podemos assumir que os dados de precipitação obtidos na estação meteorológica local são válidos para toda a zona.

Quanto ao estudo da interferência dos trabalhos mineiros nas séries piezométricas, a questão já não é tão simples, porque não podemos quantificar esse efeito.

Também a própria interpretação dos variogramas temporais poderia ter sido realizada pelo método tradicional, analisando os variogramas um a um e registando os parâmetros que os definem.

Contudo, como será fácil de perceber, qualquer uma destas abordagens não só é extremamente morosa como é fundamentalmente subjectiva. No presente caso acresce o facto de haver um volume razoável de informação que se fosse toda considerada tornava a tarefa muito confusa.

Os métodos de classificação de dados, embora insensíveis à informação específica e empírica que se tem sobre o meio em estudo, são uma primeira abordagem eficaz e rápida, constituindo um bom ponto de partida para a interpretação do sistema aquífero.

A aplicação da ACP sobre os variogramas temporais demonstrou ser capaz de identificar algumas características fundamentais do sistema aquífero e substituí, com alguma vantagem, o mesmo tipo de análise sobre as séries piezométricas, geralmente descontínuas e dificilmente simultâneas para todos os piezómetros.

Este tipo de técnica poderá mesmo servir de base à definição de índices de agitabilidade/estabilidade dos piezómetros e os resultados obtidos podem depois ser cartografados e cruzados com outros tipos de informação geológica, estrutural ou geomorfológica, para permitir a sua validação e explicação.

AGRADECIMENTO

Agradece-se à SOMINCOR a cedência dos dados hidrogeológicos assim como toda a informação disponibilizada para o presente trabalho.

BIBLIOGRAFIA

CORTEZ, L.; RIBEIRO, L. - “Aplicação de Redes Neurais à Caracterização de Sistemas Aquíferos Cársicos”, in *Anais do Seminário Recursos Hídricos Subterrâneos em Portugal: Quantidade e Qualidade*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Setembro 1996.

DAVIS, J.C. - *Statistics and Data Analysis in Geology*. 2ª ed. John Wiley & Sons. 1986.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. - *GSLIB: Geoestatistical Software Library and Users's Guide*. Oxford (U.K.), Oxford University Press. 1992.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. - *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford (U.K.), Oxford University Press. 1989.