



Análise Espacial da Hidrogeoquímica do Sistema Aquífero Moura-Ficalho

Hydrogeochemical Spatial Analysis of Moura-Ficalho Aquifer System

Judite FERNANDES, Alain FRANCÉS, Augusto COSTA

Departamento de Hidrogeologia, INETI

judite.fernandes@ineti.pt, frances.alain@ineti.pt, augusto.costa@ineti.pt

SUMÁRIO

Foram aplicadas as análises univariada, bivariada, multivariada de dados e geoestatística a uma matriz de 75 parâmetros físico-químicos analisados em 72 pontos de água no Sistema Aquífero Moura-Ficalho. Utilizou-se estatística descritiva, matrizes de correlação, análise em componentes principais, classificação ascendente hierárquica, variografia e krigagem. Foram identificadas algumas características e particularidades hidrogeoquímicas que corroboram o modelo de funcionamento do aquífero.

Palavras-chave: Sistema Aquífero Moura-Ficalho, Hidrogeoquímica, Geoestatística, Análise Multivariada de Dados.

SUMMARY

Geostatistical and multivariate data analysis techniques were applied to a matrix of 75 physical-chemical parameters analysed in 72 water points of the Moura-Ficalho aquifer system. The use of a joint geomathematical methodology incorporating descriptive statistics, correlation matrix, principal component analysis (PCA), hierarchical ascendent classification, variographic analysis and kriging interpolation put in evidence the main features of the hydrogeochemicals of this aquifer which corroborate the hydrodynamics model.

Key-words: Moura-Ficalho Aquifer System, Hydrogeochemistry, Geostatistics, Multivariate Data Analysis

Introdução

O sistema aquífero Moura-Ficalho localiza-se na região do Alentejo, na margem esquerda do Guadiana. Constitui uma das grandes reservas de água subterrânea desta região, sendo actualmente responsável por parte do abastecimento aos concelhos de Moura e Serpa, pela indústria de engarrafamento da água mineral natural Pisões-Moura e pelas termas de Santa Comba e Três Bicas, além de satisfazer as necessidades agro-pecuárias. É constituído por um aquífero principal, o de Moura-Ficalho, com uma área total da ordem de 177 km², e por três aquíferos de dimensões menores (aquíferos de Moura-Brenhas, Calcários de Moura e Ribeira da Toutalga), dependentes deste (Costa, 1991, 2001). Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Projecto HIDROPARK - Metodologias para o desenvolvimento do Parque Natural Hidrogeológico de Moura.

Enquadramento Geológico

A região é dominada pela existência de três alinhamentos de relevo principais, que se desenvolvem em direcções próximas de SE-NW, entre Sobral da Adiça e Moura, V.V. de Ficalho e Moura e entre Vale de Vargo e Moura. Os relevos alinhados correspondem a dobras anticlinoriais de rochas carbonatadas, essencialmente constituídos por dolomitos cinzentos, com algumas intercalações de metavulcanitos na base, e um nível descontínuo de rochas siliciosas no topo. Esta sequência litológica corresponde à "Formação Dolomítica", atribuída ao Câmbrico (Oliveira, 1992). Algumas destas dobras chegam a apresentar afloramentos da zona nuclear, constituídos por xistos negros, com intercalações mais os menos siliciosas, embora de reduzidas dimensões, que correspondem à chamada "Série Negra", de idade pré-câmbrica. As zonas mais deprimidas correspondem a estruturas sinclinais, de rochas menos resistentes à erosão, que fazem parte do "Complexo Vulcano-Sedimentar

de Ficalho-Moura", de idade ordovícica, constituído por níveis descontínuos de mármore calcíticos e calcários dolomíticos (equivalente ao "Olho de Mocho"), com passagens laterais e, para o topo, a metavulcanitos.

O suporte físico do aquífero Moura-Ficalho são as rochas carbonatadas do soco hercínico:

- Dolomitos do Câmbrio inferior ("Formação Dolomítica");
- Mármore calcíticos e calcários dolomíticos, por vezes com intercalações de metavulcanitos, do Ordovício médio ("Complexo vulcano-sedimentar de Ficalho-Moura").

Os limites do aquífero correspondem a contrastes litológicos entre as formações essencialmente carbonatadas do aquífero e as formações impermeáveis ou menos permeáveis que as envolvem.

Análise de Dados

Em Setembro de 2004, efectuou-se uma campanha que permitiu adquirir ou completar a informação sobre 102 pontos de água e colher amostras de água para análise físico-química de iões principais em 72 furos, poços e nascentes, dos quais 68 pontos foram sujeitos à pesquisa de metais pesados e elementos vestigiais, num total de 75 parâmetros pesquisados, que serão referidos no texto de modo abreviado (Figura 1). Foi também efectuada a pesquisa de hidrocarbonetos em 11 pontos de água (Costa *et al.*, 2006a).

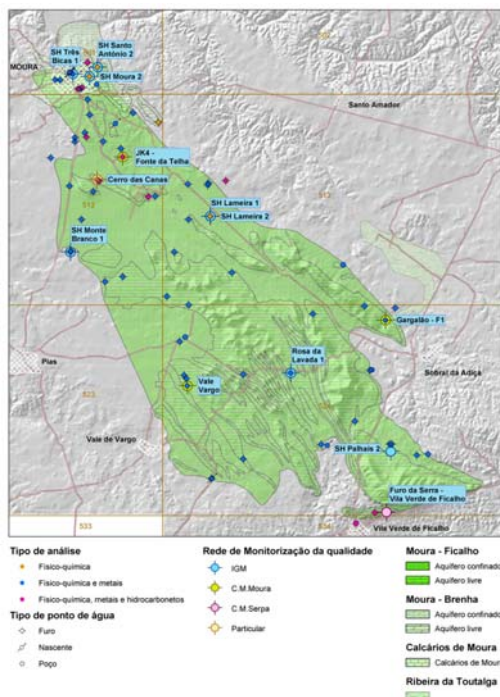


Fig.1: Enquadramento do Sistema Aquífero, da rede de monitorização da qualidade que opera desde 1997 e dos pontos de água amostrados em Setembro 2004.

Os parâmetros estatísticos dos elementos principais encontram-se expressos na Tabela 1 em mg/L. As águas apresentam um pH geralmente superior a 7

(mediana de 7,3), têm uma mineralização relativamente elevada (mediana do resíduo seco a 180° C de 596 mg/L), sendo águas duras (mediana de 440 mg/L de CaCO₃).

Tab.1: Estatísticas das análises a elementos maiores

Parâmetros	n	Média	Mínimo	q1	Mediana	q3	Máximo	Variância
Condutividade (µS/cm)	72	914	434	783	913	1020	2300	578981532
pH	72	7.35	6.86	7.24	7.34	7.44	8.06	0.0348
Resíduo Seco (mg/l CaCO ₃)	72	591.9	296.0	518.8	595.6	637.6	1460.6	228939943.0
K ⁺ (mg/l)	72	2.4	0.5	1.0	1.5	2.0	30.0	187282.0
Ca ²⁺ (mg/l)	72	113.9	39.0	101.0	119.8	128.1	204.4	7763263.0
Mg ²⁺ (mg/l)	72	35.8	1.6	27.1	37.3	42.0	62.0	1476091.0
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	72	431.1	41.5	416.0	438.5	466.7	573.4	62069769.0
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	72	34.2	3.8	23.7	29.1	39.1	191.6	5767168.0
Cl ⁻ (mg/l)	72	100.7	17.8	64.6	106.7	129.4	448.7	32131452.0
NO ₃ ⁻ (mg/l)	72	37.0	1.2	18.7	34.9	46.9	135.3	7517864.0
Na ⁺ (mg/l)	72	39.4	9.2	26.5	37.0	43.0	244.0	787254.0
F ⁻ (mg/l)	72	0.8	0.0	0.6	0.8	0.9	3.3	0.2
SiO ₂ (mg/l)	72	20.2	4.7	15.7	18.3	22.7	56.9	63924.0

n = número de amostras

Esta campanha, que se pretendeu o mais abrangente possível em termos espaciais, permitiu confirmar a predominância da fácies bicarbonatada cálcica no aquífero principal de Moura-Ficalho, bem como nos aquíferos Moura-Brenhas e calcários de Moura (Figura 2). Em 65 pontos analisados no aquífero principal, apenas 5 possuem uma fácies diferente. Os pontos 512F19, 512F28 e 512F46 possuem uma fácies bicarbonatada magnesiânica-cálcica. Na nascente 524N5 (Banhos da Ferradura) a água é bicarbonatada sódica-magnesiânica e em Monte Branco é cloretada calco-sódica. No aquífero dos "Calcários de Moura" a água é, por vezes, bicarbonatada calco-magnesiânica. Outras captações na cobertura terciária possuem uma fácies cloretada sódica.

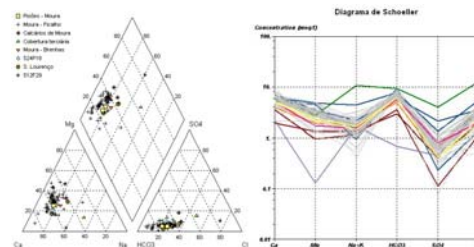


Fig.2: a) Diagrama de Piper e b) Diagrama de Schoeller dos 72 pontos analisados em Setembro de 2004.

Da aplicação da classificação ascendente hierárquica aos indivíduos, resultou que, para uma distância de corte de 0,23, obtiveram-se 13 grupos, dos quais 11 têm um único indivíduo, 1 grupo tem 2 indivíduos e o último apresenta 59 indivíduos. Estes resultados confirmam a grande homogeneidade química do aquífero principal. Os pontos de água mais afastados deste conjunto têm, geralmente, em comum, uma mineralização mais elevada e/ou teores de nitratos mais elevados.

De acordo com a sua concentração nas águas agregaram-se os elementos menores em 3 grupos (Tabela 2). O 1º grupo (verde) corresponde aos elementos com concentrações mais importantes no Sistema Aquífero, onde se encontram o Brómio, Ferro, Estrôncio, Bário e Iodo, com a mediana

compreendida entre 36 e 492 µg/L. Salienta-se que em cerca de 25% das amostras o estrôncio excede o limite superior de detecção do aparelho e não estão quantificadas. Um segundo grupo (amarelo), cuja mediana varia no intervalo de 1,5 a 7,3 µg/L, é constituído por Zinco, Escândio, Alumínio, Selênio, Lítio, Crómio, Titânio, Arsénio e Cobre.

Tab.2: Estatísticas das análises a elementos vestigiários e metais pesados

Parâmetros µg/L	n	Média	Mínimo	q1	Mediana	q3	Máximo	Variância
Bromio	68	465.70	137.56	383.26	492.06	570.41	730.78	23301.06
Ferro	68	188.11	70.07	122.55	194.33	240.47	387.42	4833.61
Estrôncio	68	162.48	51.73	142.63	176.25	>200	>200	1712.35
Bário	68	62.02	5.99	43.45	54.75	78.65	>200	1458.52
Iodo	68	45.41	8.34	25.38	36.42	47.22	505.53	3692.92
Zinco	65	23.68	0.58	3.56	7.33	20.01	>250	1857.17
Escândio	68	5.08	1.99	4.21	4.99	6.14	8.80	2.69
Alumínio	18	8.51	2.02	3.55	4.46	7.14	63.20	195.54
Selênio	67	3.63	0.33	2.16	3.36	4.63	11.96	3.80
Lítio	65	3.87	1.15	2.14	3.08	4.48	18.65	8.25
Crómio	66	1.96	0.53	1.34	1.87	2.28	13.73	2.53
Titânio	68	1.90	0.46	1.45	1.79	2.18	5.16	0.51
Arsénio	68	5.98	0.15	1.04	1.68	3.23	163.08	407.58
Cobre	33	8.87	0.20	0.99	1.45	5.28	162.61	801.48
Rubídio	68	1.04	0.16	0.48	0.68	1.00	7.72	1.76
Vanádio	67	1.17	0.11	0.47	0.67	1.09	12.66	2.97
Níquel	41	1.43	0.30	0.38	0.66	1.67	9.34	3.86
Manganês	44	15.72	0.10	0.20	0.51	1.21	599.97	8179.36
Urânio	68	0.62	0.01	0.34	0.45	0.67	2.88	0.30
Molibdénio	51	0.52	0.10	0.14	0.22	0.58	3.94	0.56
Tungsténio	68	0.30	0.04	0.06	0.09	0.13	7.36	1.08
Antimónio	66	0.14	0.02	0.05	0.07	0.12	2.00	0.07
Cobalto	54	0.12	0.01	0.03	0.04	0.06	3.87	0.27
Ítrio	66	0.14	0.00	0.01	0.03	0.16	1.01	0.05

n = número de amostras

Os elementos Rubídio, Vanádio, Níquel, Manganês, Urânio, Molibdénio, Tungsténio, Antimónio, Cobalto e Ítrio, que constituem o 3º grupo (azul), apresentam uma mediana inferior a 0,7 µg/L e valores máximos superiores a 1 µg/L. Os restantes 38 elementos analisados apresentam concentrações muito baixas e não têm expressão.

Através da análise dos *boxplots* e da comparação do 3º quartil com os valores máximos, verifica-se que, para os elementos Manganês, Iodo, Zinco, Arsénio, Cobre, Bário, Alumínio e Prata, existem valores anómalos bastante elevados e que diferem 1 a 2 ordens de grandeza do 3º quartil.

Aplicou-se a Análise em Componentes Principais a uma matriz com 68 indivíduos, 8 variáveis activas (Na, K, Ca, Mg, Cl, HCO₃, SO₄ e NO₃) e 29 variáveis suplementares (F, SiO₂, condutividade eléctrica, pH, RS e os elementos menores da Tabela 2). O resultado obtido encontra-se na figura 3, onde se podem visualizar as projecções para os 3 primeiros eixos com 75 % de explicação acumulada. O Eixo 1 representa a mineralização da água, construído pelos iões Cl, SO₄, Na, Ca e Br. O Eixo 2 traduz os fenómenos de interacção água-rocha, apresentando os iões HCO₃-Mg (dolomitos) coordenadas fortemente negativas. Este eixo separa ao nível dos indivíduos as águas cloretadas sódicas das águas bicarbonatadas calco-magnesianas. O Al opõe-se ao grupo HCO₃-Mg uma vez que para pH 7 o Al diminui na solução. O Eixo 3 representa o impacto das actividades agrícolas, o grupo K-NO₃-Ca apresenta coordenadas fortemente negativas. Esta associação é explicada por fenómenos de troca iónica e de adsorção entre estes iões.

Quanto aos elementos menores, o seu posicionamento relativo sugere alguns agrupamentos, tais como Al-V-Cr, As-Cu, Se-Ba-Ti-

SiO₂, Mo-W, Sr-Br, Ni-Co, Sb-Li-As, Rb-SiO₂, entre outros. Estas e outras ligações foram evidenciadas pela matriz de correlação dos 75 elementos maiores e menores, nomeadamente:

Na com SO₄ e Cl (0,83 e 0,84); RS com Cl e SO₄ (0,88 e 0,81); SiO₂ com Ti (0,86); Br com Cl (0,87); Al com Cr e V (0,90 e 0,82); As com Sb (0,87).

Na figura 4 encontram-se os resultados obtidos da aplicação da Classificação Ascendente Hierárquica às variáveis, para as distâncias mais baixas e para os agrupamentos até à 8ª ordem.

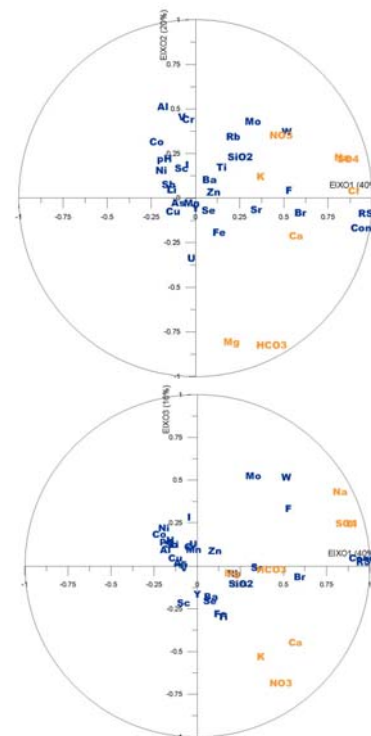


Fig.3: a) Projecção das variáveis nos eixos 1 e 2; b) Projecção das variáveis nos eixos 1 e 3. Variáveis activas a laranja e variáveis suplementares a azul.

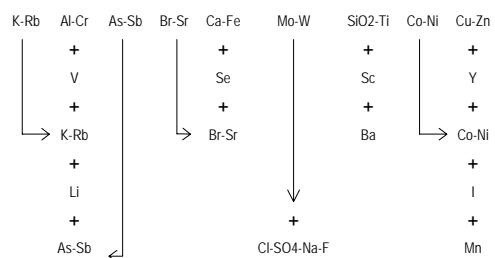


Fig.4: Agrupamentos de 8ª ordem da CAH aplicada a elementos maiores e menores.

Ao confrontar estes resultados com as formações geológicas existentes encontramos alguma sustentabilidade para estas associações. Com efeito, ocorrem importantes depósitos de sulfuretos, predominantemente, de Zn-Pb (Ag) nas Dolomias de Ficalho (Oliveira *et al.*, 1992) que constituem parte da matriz rochosa do sistema aquífero. A mineralização aflora sob a forma de chapéu de ferro e óxidos de Zn, os quais passam em profundidade a

sulfuretos. Segundo V. Oliveira (informação oral) na zona de oxidação dos chapéus de ferro encontram-se, entre outros, sulfato de Ba (Barite) e sulfato de Sr (Celestite). Na paragénese mineral existem sulfuretos de Cu, As, minerais de Mn, Sb, Cd, V, Ag e Au, entre outros. Na zona de Vale Vargo está assinalada uma ocorrência de Pb e Sb (Oliveira *et al.*, 1992) e na zona da Preguiça uma de Zinco calamar com V associado (Descloizite). Os metavulcanitos básicos podem explicar associações como Al-Cr-V, Ni-Co enquanto que o Mo-W pode ter origem nos metavulcanitos ácidos. Os feldspatos justificam K-Rb-SiO₂. Outras associações não serão tão evidentes, pelo que carecem do desenvolvimento de estudos que envolvam a geoquímica de solos e rochas.

Análise Geoestatística

Através da análise variográfica e interpolação por krigagem mapearam-se os 3 primeiros eixos da ACP (figura 5).

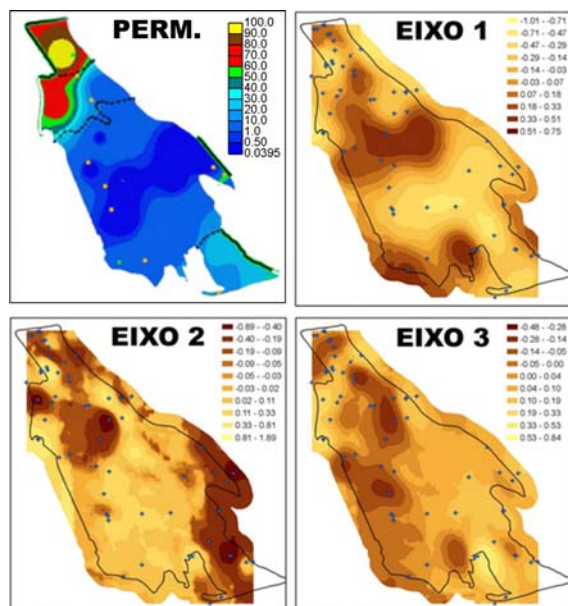


Fig.5: Mapa de permeabilidades e mapeamento dos 3 eixos da ACP.

Este mapeamento é coerente com o conhecimento hidráulico do sistema. Para o eixo 1 as áreas de menor mineralização da água correspondem às zonas de recarga, aumentando a mineralização com o percurso ao longo do aquífero até aos valores mais elevados nas zonas de descarga. Esta análise é concordante com o mapa de permeabilidades hidráulicas resultante da calibração do modelo de escoamento por modelação inversa com o algoritmo PEST (Costa *et al.*, 2006b).

Para o eixo 2 verificou-se que as águas bicarbonatadas calco-magnesianas surgem após processos de interacção água-rocha, ou seja nas zonas em que há algum tempo de residência das águas (zonas confinadas) e nas zonas de descarga. Comparando o mapeamento do eixo 3 com a ocupação do solo (Corine, 2000) constata-se que os

valores negativos que traduzem o impacto das actividades agrícolas, como a adubação (K-NO₃), correspondem essencialmente às áreas agrícolas, enquanto que os valores positivos que representam zonas pouco contaminadas correspondem às zonas de recarga ocupadas por olivais.

Mapeou-se a razão Cl/Br e projectou-se em função da distância longitudinal do sistema de SE para NW (Figura 6). Este indicador da origem da mineralização da água (Davis *et al.*, 1998) mostra uma tendência de crescimento para as zonas de descarga do sistema. Destacam-se do conjunto 3 pontos com razões de 658, 367 e 329 que captam a cobertura cenozóica e não o aquífero principal. O valor de 658 é indicador da existência de salmouras (Davis *et al.*, 1998), que poderão ter tido origem no ambiente de deposição da cobertura cenozóica e/ou na forte reconcentração de sais devido aos elevados índices de evaporação nos climas semiáridos. Estas coberturas devem ser a principal origem dos sais que se detectam no aquífero principal.

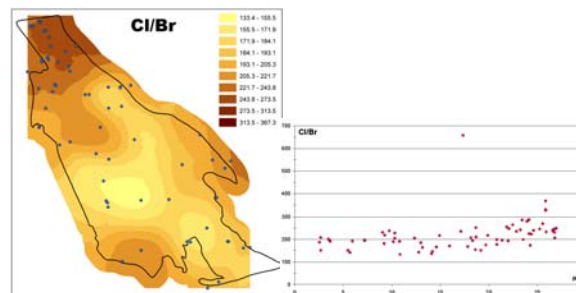


Fig.6: Mapa de Cl/Br e projecção ao longo da distância longitudinal do sistema para NW.

Conclusões

Através da aplicação de técnicas geoestatísticas e análise multivariada de dados foi possível identificar algumas características e particularidades hidrogeoquímicas que corroboram o modelo de funcionamento do Sistema aquífero Moura-Ficalho.

Referências Bibliográficas

- [1] Costa, A. M. (1991) Sistemas Aquíferos da Região de Moura, in Com. Serv. Geol. Port., tomo 77, pp. 133-146.
- [2] Costa, A. M. (2001) Sistema Aquífero Moura-Ficalho. Anexo II - Fichas dos Sistemas Aquíferos do Alentejo do Relat. Téc. do Proj. ERHSA. CCRA, Évora, 130 p.
- [4] Costa, A. M., Francés A., Fernandes J., Lourenço C., Midões C., Ribeiro L. & Oliveira E. (2006a) Estudo Hidrogeoquímico do Sistema Aquífero Moura-Ficalho, 8º Congresso da Água.
- [3] Costa, A. M., Francés A., Lubczynski M. W. & Ribeiro L., (2006b) Modelo numérico de fluxo em regime transitório: o caso do aquífero Moura-Ficalho, 8º Congresso da Água.
- [5] Davis, S.N., Whittemore, and Fabryka-Martin (1998) Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water. Ground Water, 36, no.2, pp.338-350.
- [6] Oliveira J. T. coord. (1992) Notícia explicativa da folha 8 da Carta Geológica de Portugal à escala 1/200000. Instituto Geológico e Mineiro, 91 p.