

### **AVALIAÇÃO DE RESPOSTAS EM UM AQUIFERO KARST COM EMPREGO DE FUNÇÃO DE CORRELAÇÃO CRUZADA**

MARQUES, Guilherme Fernandes<sup>1</sup>; COTA, Stela<sup>2</sup>; MIRANDA, Marcela Palhares<sup>3</sup>;  
RODRIGUES, Paulo<sup>2</sup>

**Resumo** – Os sistemas cársticos, comuns na região semi-árida brasileira, são de grande importância para a hidrologia regional como fonte de abastecimento de água. Devido à sua inerente complexidade, a identificação de fluxos e conexões ainda constitui um objetivo com vários desafios, tendo se valido de técnicas diversas como o uso de traçadores. Este trabalho buscar contribuir para o estudo de sistemas cársticos ao aplicar método de análise de séries temporais em dados de nível piezométrico com alta resolução temporal, obtidos com o emprego de registradores de nível automáticos. Os resultados foram empregados para identificar possíveis correlações entre um grupo de poços, bem como o tempo de resposta.

**Abstract** – Karst aquifers are common in many Brazilian regions, representing important water supply sources in regional and local hydrology systems. Given its natural complexity, identification of fluxes and connections in karst aquifers remains a difficult task, resorting frequently to tracer methods. This paper contributes to the study of karst systems by applying time series analysis method to high temporal resolution data, obtained with automatic dataloggers installed in the study area. Results were used to identify potential correlation among a group of wells, as well as the response time.

**Palavras-Chave** – carste, análise de séries temporais, correlação cruzada

### **INTRODUÇÃO**

O domínio cárstico fraturado é comum nas regiões semi-áridas e semi-úmidas do Brasil, representando mais de 145.145 km<sup>2</sup> ou 23% da bacia do Rio São Francisco

---

<sup>1</sup>Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Av. Amazonas, 7675, Belo Horizonte, MG, Brasil. gmarques@civil.cefetmg.br.

<sup>2</sup> Pesquisador, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN / CNEN), Caixa Postal 941, Belo Horizonte, MG, Brasil. sdsc@cdtn.br; pchr@cdtn.br.

<sup>3</sup> Assistente de Pesquisa, Engenharia de Produção Civil, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Av. Amazonas, 7675, Belo Horizonte, MG, Brasil. m\_palhares@yahoo.com.

(MATOS e ZOBY, 2004) e constituem 8% do total de exploração das reservas de água subterrânea. São formados em rochas calcáreas ou carbonáticas, onde a circulação da água se faz nas fraturas e outras descontinuidades (diáclases) que resultaram da dissolução do carbonato pela água. Essas aberturas podem atingir grandes dimensões, criando verdadeiros rios subterrâneos. São aquíferos heterogêneos, descontínuos, com águas duras, com fluxo em canais.

Estes sistemas são importantes componentes da hidrologia regional como fontes abastecimento de água, em função da característica intermitente das águas superficiais no semi-árido. Desta forma, compreender seu comportamento e respostas a intervenções antrópicas é o primeiro passo para assegurar o uso sustentável das reservas e a disponibilidade futura da água. Em Marques et al, (2011), dados do monitoramento com registradores automáticos de nível em um grupo de oito poços no aquífero cárstico Bambuí foram analisados para avaliar o grau de carstificação do aquífero, por meio das respostas dos poços a eventos de chuva. Esse estudo identificou regiões com diferentes comportamentos, tendo a parte mais baixa da bacia apresentado carste mais desenvolvido, com efeito de memória mais curto, enquanto que a porção superior se mostrou menos desenvolvida, com efeito memória mais longo e potencial para maior capacidade de armazenamento de água subterrânea.

O presente artigo investiga as possíveis conexões entre os poços perfurados na mesma área de estudo de Marques et al (2011), com uso da função de correlação cruzada, para verificar a existência de possíveis conexões hidráulicas no aquífero. Esses resultados auxiliarão na elaboração de um modelo conceitual de fluxo do aquífero estudado, colaborando para o planejamento do uso dos mananciais subterrâneos e superficiais na bacia.

## **MÉTODOS**

O nível da água dos poços foi monitorado com registradores de nível automáticos durante oito meses em intervalos de quinze minutos, nos poços indicados na Figura 1. A fim de caracterizar o sistema e averiguar a conexão hidráulica entre poços foi utilizada a função de correlação cruzada. No método (Jenkins e Watts, 1968), a função de correlação cruzada (FCC) é usada para analisar as relações entre duas séries de dados para valores diversos de  $k$  ( $k > 0$ ), na qual  $k$  é o tempo de defasagem (*lag*) (Chatfield, 1982) entre as duas séries. O coeficiente de correlação ( $R_{xy}$ ) varia entre -1 e 1, sendo que, quanto maior  $|R_{xy}|$ , mais forte é a correlação. Valores de  $R_{xy}$  próximos de zero

indicam correlação nula (Kvanli, 1988). Neste trabalho, as séries de níveis de água nos poços foram inicialmente convertidas para séries com valores médios diários, uma vez que não foram detectadas variações significativas na resolução de 15 minutos. Em seguida, foi feita conversão para séries de alteração de nível, onde cada valor em um dado dia corresponde à diferença entre o nível médio naquele dia e o nível médio no dia anterior. Ao comparar duas séries de alteração de nível de poços diferentes, é possível avaliar quando uma determinada alteração em um dos poços é percebida no outro poço. Esta avaliação foi feita com a FCC, que calcula o coeficiente de correlação entre as séries para vários *lag* de tempo, permitindo identificar o *lag* correspondente ao valor máximo de  $R_{xy}$  calculado. Neste trabalho, o tempo de defasagem  $k$  (*lag*), foi variado de 1 a 168 horas (uma semana).



Figura 1 - Poços equipados com registradores automáticos de nível (triângulos em laranja)

## RESULTADOS

Os maiores valores de coeficiente de correlação ( $R_{xy}$ ) atingidos foram de 0,608 em *lag* de 4 horas (correlação entre P59 e P104) e 0,601 em *lag* de 2 horas (correlação entre P59 e P49) (Figura 2). Na Tabela 1 são apresentados os valores de  $R_{xy}$  mais altos obtidos para o grupo de poços estudados.

O poço 59, localizado em uma região central com presença de rocha pelítica, foi o que obteve os mais altos coeficientes, indicando que pode haver nessa área uma rede de condutos bem desenvolvida que caracteriza uma boa conexão desse poço com os demais. Esse comportamento também pode ser observado entre outros poços da região central, que apresentaram correlações menores, porém significativas, e lags maiores, por estarem mais distantes, como é o caso da relação P104 e P113, com coeficiente de 0,19 em *lag* de 74 hs. Os lags chegam a 149 horas (P35/P113), com predominância de lags

em torno de 20 horas na região central. Correlações insignificantes foram verificadas entre poços localizados em unidades cársticas diferentes (coeficiente de 0,07 entre P35/P59 e 0,05 entre P35/P99, por exemplo).

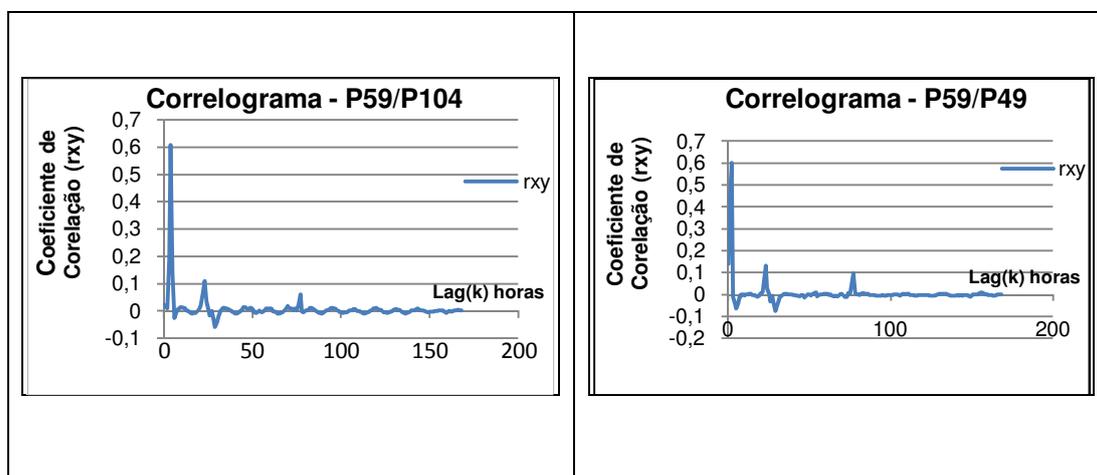


Figura 2 - Correlogramas entre os poços P59/P104 e P59/P49

Tabela 1 - Coeficientes de correlação e tempo (lag) (em horas) para os poços analisados

Poços	P59	P99	P35	P41	P104	P49	P107	P113
<b>P59</b>	—	Rxy: 0,04 Lag: 105h	Rxy: 0,07 Lag:0h	Rxy:0,48 Lag: 28h	Rxy: 0,6 Lag:4h	Rxy: 0,6 Lag: 2h	Rxy: 0,35 Lag:23h	Rxy:0,268 Lag: 78h
<b>P99</b>	—	—	Rxy:0,05 Lag:122h	Rxy:0,03 Lag: 9h	Rxy: 0,04 Lag:122h	Rxy: 0, 028 Lag:104h	Rxy: 0,01 Lag:30h	Rxy: 0,04 Lag:54h
<b>P35</b>	—	—	—	Rxy:0,05 Lag:19h	Rxy: 0,07 Lag:91h	Rxy: 0,04 Lag:107h	Rxy:0,059 Lag:0h	Rxy: 0,21 Lag:149h
<b>P41</b>	—	—	—	—	Rxy:0,04 Lag:49h	Rxy:0,046 Lag:48h	Rxy:0,01 Lag:48h	Rxy:0,12 Lag:50h
<b>P104</b>	—	—	—	—	—	Rxy: 0, 088 Lag:19h	Rxy:0,24 Lag:19h	Rxy: 0,19 Lag:74h
<b>P49</b>	—	—	—	—	—	—	Rxy:0,27 Lag:21h	Rxy:0,18 Lag:76h
<b>P107</b>	—	—	—	—	—	—	—	Rxy: 0,24 Lag:0h

## CONCLUSÕES

A análise de séries temporais se mostrou uma ferramenta útil para a avaliação de possíveis conexões no sistema estudado. A porção central da área de estudo apresentou uma boa conexão entre os dutos (carste mais desenvolvido e com presença de pelitos), enquanto poços localizados em unidades cársticas diferentes não apresentaram boa conectividade. Esse resultado confirma o trabalho feito anteriormente entre a resposta dos poços e da chuva.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq e FAPEMIG.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- MARQUES, Guilherme Fernandes; COTA, Stela; Braga Jr., Paulo Vicente; VELÁSQUEZ, Leila Menegasse; RODRIGUES, Paulo; DE PAULA, Rodrigo Sérgio. Hydrodynamic Characterization of a Karst Aquifer in the Brazilian semi-arid Region with Time Series Analysis of Hydrology Data. In: 2011 World Environmental & Water Resources Congress: Bearing knowledge for sustainability. Palm Springs. Maio, 2011.
- ZOBY, José Luis Gomes. Panorama da Qualidade das Águas Subterrâneas no Brasil. Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVI Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2008.
- JENKINS, Gwilym M.; WATTS, Donald G.; 1968: Spectral Analysis and Its Applications. Holden-day, SF, 525pp.
- CHATFIELD, C., 1982. The Analysis of time series: Theory and practice: London, Chapman and Hall.
- KVANLI, Alan H. 1988 Statistics: a computer integrated approach, 1019pp.