



VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DE COTAS PIEZOMÉTRICAS E SUAS AUTOCORRELAÇÕES

Dione I. C. Milani

dioneicmilani@utfpr.edu.br

UTFPR-Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rua Cristo Rei, n. 19. CEP 85902490, Toledo, Paraná, Brasil.

Neida M. P. Volpi

neida@ufpr.br

UFPR-Universidade Federal do Paraná

Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 210, Jardim das Américas, Curitiba – PR, CEP 81531-970

Rosângela A. B. Assumpção

rosangelaa@utfpr.edu.br

UTFPR-Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rua Cristo Rei, n. 19. CEP 85902490, Toledo, Paraná, Brasil

Resumo. As subpressões, causadas pelo fluxo da água, são uma das principais ferramentas de monitoramento de segurança de uma barragem e são medidas pelos piezômetros. Do ponto de vista da geoestatística, as cotas piezométricas podem ser consideradas como séries espaço-temporais, portanto é necessário analisá-los sob estes dois pontos de vista, ao longo da região e no decorrer do tempo. Este estudo objetivou comparar a variação espaço-temporal, através dos vetores RF (Random Function) e dos vetores TS (Time Series). Os resultados mostraram que, a variação espacial ao longo do tempo foi pequena, com maior autocorrelação entre as primeiras 8 estações e menores nas outras. A variação temporal mostrou que existem regiões que possuem maior autocorrelação que outras, e que, alguns piezômetros tiveram comportamento semelhante. Também foi possível perceber que, no verão de 2013 houve uma diminuição nas cotas piezométricas, o que diminui a covariância espacial daquele instante, em relação as outras estações. Os vetores RF tiveram alta correlação entre todas as estações, já os vetores TS foram mais sensíveis, mostrando melhor a existência ou não de similaridade no comportamento dos piezômetros.

Keywords: Piezômetros, Variação espaço-temporal, Geoestatística, Covariância.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia adotada na construção da Usina Hidrelétrica de Itaipu usou as tecnologias mais avançadas existentes naquele momento. A Itaipu possui uma capacidade de 14.000 MW, distribuída em 20 unidades geradoras e é a maior usina hidrelétrica em operação no mundo. A Itaipu é responsável por cerca de 20% da energia consumida no Brasil e de 95% da energia consumida no Paraguai. Possui localização central em relação as maiores áreas industriais e urbanas do Brasil e do Paraguai, no Rio Paraná e tem coordenadas geográficas aproximadas 25°24'29"S, 54°35'21"O (Itaipu Binacional, 2009).

Desde o estudo da viabilidade até os dias atuais, a usina mantém constante atenção sobre sua segurança. Para isso, fez-se um minucioso estudo sobre a geologia local e instalou-se vários instrumentos nas barragens e nas fundações, a fim de monitorar diversos parâmetros importantes. A instrumentação está sempre em constante estudos, a fim de assegurar sua eficácia e, se necessário, a instalação de novos instrumentos em locais estratégicos ou sua modernização. Tudo isso gera um grande volume de dados armazenados, que precisam ser estudados, a fim de entender e prever qualquer anomalia. Entre os instrumentos do monitoramento de fundação e estrutura, tem-se mais de 650 piezômetros que estão instalados ao longo da barragem, de acordo com sua necessidade, dada pelo projeto de instrumentação da barragem (Patias, 2010).

Os piezômetros são instrumentos que fornecem a carga hidráulica de pressão no ponto em que são instalados. Existem vários tipos de piezômetros. Os instalados na Usina Hidrelétrica de Itaipu, são do tipo Standpipe, cuja leitura fornece a cota piezométrica a qual equivale à carga hidráulica total no ponto da instalação, dada pela soma da cota de instalação com a subpressão.

Os valores das cotas piezométricas tem sido monitorados desde o início de enchimento do reservatório. Atualmente existem piezômetros de leitura manual e de leitura automática e estão instalados ao longo de toda a barragem, com maior concentração nos blocos-chave, e nas principais feições do maciço de fundação. Observa-se que uma das feições mais estudadas na construção da barragem, foi a Descontinuidade D (ou Junta D), localizada no interior do basalto denso do derrame. Nos anos iniciais, as leituras piezométricas eram diárias, após alguns anos, estas leituras deixaram de ter grandes alterações, e sua frequência de leitura hoje, é em torno de 15 dias pra os manuais.

A Usina Hidrelétrica de Itaipu é composta por diferentes tipos de barragens. A Figura 1 apresenta um esquema da estrutura de barramento, com a seguinte identificação: 1) Barragem de terra esquerda; 2) Barragem de enrocamento; 3) Barragem de ligação esquerda e direita (Trecho I e Trecho E); 4) Estrutura de desvio (Trecho H); 5) Barragem Principal (Trecho F); 6) Casa de força e área de montagem; 7) Barragem Lateral Direita (Trecho D); 8) Vertedouro (Trecho A) e 9) Barragem de terra direita.

Diante disso, optou-se por estudar a variabilidade espaço-temporal das cotas piezométricas para um total de 67 piezômetros de leitura manual que estão instalados dentro da Junta D e ao longo dos blocos A, D e E. Estas estruturas são representados na Fig. 1 pelas estruturas 8, 7 e 3, respectivamente. O período de tempo estudado foi de março de 2012 à março de 2015, e, para o estudo dos vetores RF, este tempo foi separado por estações do ano: primavera, verão, outono e inverno, sendo 4 estações em 3 anos, totalizando 12 instantes. Para o estudo sobre os vetores TS, usou-se um espaço de tempo de 15 dias ao longo dos 3 anos e a comparação foi feita entre os piezômetros.

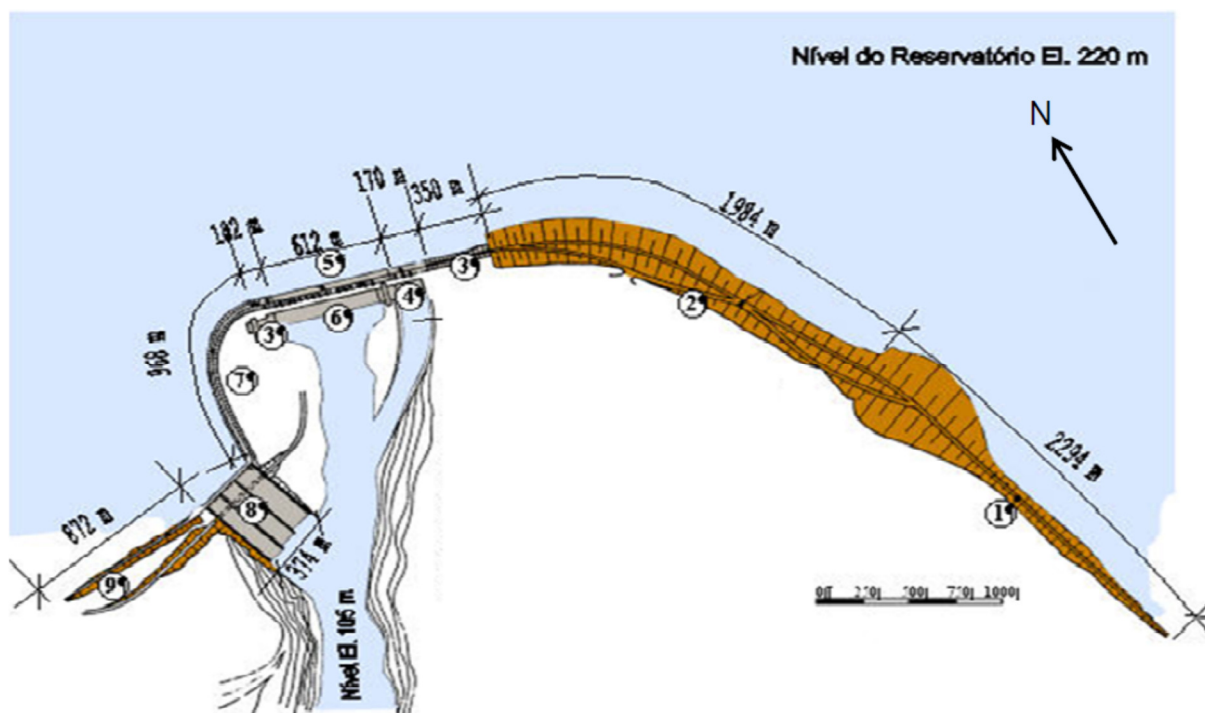


Figura 1. Configuração das estruturas da barragem de Itaipu (Itaipu Binacional, 2008)

2 GEOESTATISTICA ESPAÇO-TEMPORAL

Para estudarmos a variação espaço-temporal da cota piezométrica, definida como $Z(u,t)$, onde u é um ponto no espaço (x,y) e t o tempo em dias, fez-se uma comparação através de dois métodos: os vetores RF (Random Function), com domínio $u \in D$, e os vetores TS (time series) com domínio $t \in T$ (Kyriakidis & Journel, 1999).

A função aleatória RF $Z(u,t)$ é definida como um conjunto de vetores aleatórios RV $Z(u,t)$, normalmente dependente, sendo um vetor para cada localização $u \in D$ no instante de tempo $t \in T$. Uma realização de RF $Z(u,t)$ é um conjunto de vetores aleatórios RVs.

A função aleatória TS $Z(u,t)$ é definida como um conjunto de vetores aleatórios onde, para cada localização no espaço, tem-se uma série temporal.

2.1 Vetores RF (Random Function)

A variável $Z(u,t)$ pode ser escrita como:

$$Z(u,t) = m(u,t) + R(u,t), \quad \forall (u,t) \in D \times T. \quad (1)$$

Onde $Z(u,t)$ é a função aleatória com domínio no espaço $u \in D$, $m(u,t)$ é a função determinística do tempo-espaço no ponto u e tempo t e $R(u,t)$ é a variação espaço-temporal em torno de $m(u,t)$ com média zero.

Assim, para um número finito $t = 1, \dots, T$:

$$Z(u,t) = Z(u) = [Z_t(u)] = [Z_{t_1}(u), \dots, Z_{t_T}(u)]' = [Z_1(u), \dots, Z_T(u)]' \quad (2)$$

O intervalo de tempo utilizado nesta análise foram as estações do ano, com início no outono de 2012 até o verão de 2015, totalizando 12 intervalos de tempo, sendo que, para cada instante t , tem-se uma interpolação espacial com base na geoestatística.

Assumindo estacionariedade, a matriz de covariância $C(h)$ entre dois valores de t , separados por uma distância h , aqui representada pela estação do ano, pode ser representada por:

$$C(h) = \begin{bmatrix} C_{11}(h) & \cdots & C_{1j}(h) & \cdots & C_{1T}(h) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{i1}(h) & \cdots & C_{ii}(h) & \cdots & C_{iT}(h) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{T1}(h) & \cdots & C_{Tj}(h) & \cdots & C_{TT}(h) \end{bmatrix} \text{ com } T = 12 \quad (3)$$

$$\text{onde } C_{ij}(h) = \text{Cov}\{Z_i(u), Z_j(u+h)\} \approx \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n [z(u_\alpha, t_i) - m_i][z(u_\alpha + h, t_j) - m_j] \quad (4)$$

Mapas temáticos foram gerados, usando as ferramentas da geoestatística, onde o modelo ajustado para o semivariograma foi o modelo exponencial. Através da krigagem ordinária, gerou-se um grid de 25X25, que totalizou 206 pontos dentro da fronteira convexa (Yamamoto, 1997), os quais foram utilizados para determinar a matriz de covariância $C(h)$.

Porém, a covariância é afetada pela dimensão e pelo número de dados usados para encontrá-la, assim, optou-se por usar o coeficiente de correlação ρ , onde a matriz de correlação pode ser expressa como:

$$\rho(h) = \begin{bmatrix} \rho_{11}(h) & \cdots & \rho_{1j}(h) & \cdots & \rho_{1T}(h) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{i1}(h) & \cdots & \rho_{ij}(h) & \cdots & \rho_{iT}(h) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{T1}(h) & \cdots & \rho_{Tj}(h) & \cdots & \rho_{TT}(h) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{onde } \rho_{ij}(h) = \frac{C_{ij}(h)}{\sigma_i \sigma_j} \quad (6)$$

O coeficiente de correlação nos apresenta valores de -1 a 1, onde próximos de 0 significam conjuntos com pouca ou nenhuma correlação, valores quanto mais perto de -1 significam conjuntos inversamente correlacionados e quanto mais perto de 1 significam valores diretamente proporcionais.

A Figura 2 mostra os mapas gerados por krigagem ordinária para as 12 estações em estudo, nela, percebe-se que as cotas piezométricas sofrem pouca alteração ao longo do

tempo, pois os mapas são quase idênticos. As maiores alterações, ainda que pequenas, são percebidas no verão 13/14 e primavera 14.

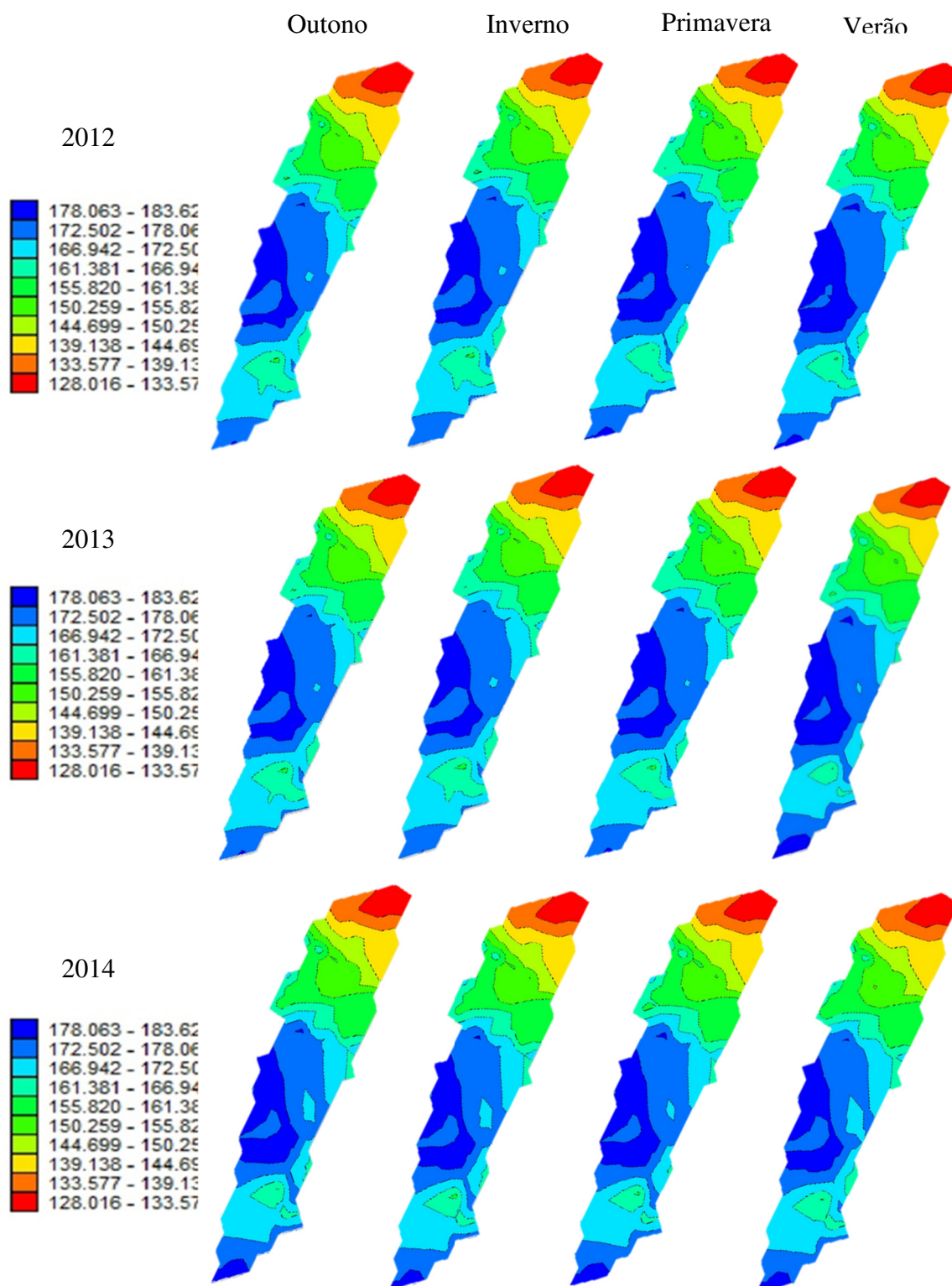


Figura 2. Mapas temáticos da cota piezométrica do outono de 2012 ao verão 2014/2015

Como a cota piezométrica é dada pela cota de instalação mais a subpressão, o relevo da Junta D e a magnitude destas variações podem influenciar estes resultados, podendo estar mascarando as variação temporal existente, já que a variação da subpressão é pequena comparada a variação da cota de instalação.

Com base nas cotas piezométricas krigadas para todos os valores da região de estudo, estimou-se as covariâncias de acordo com a Eq. (4) e a matriz de covariância dada na Eq. (3). Em seguida, usou-se esta matriz para encontrarmos a matriz de correlação, calculada pela Eq. (6) e mostrada na Eq. (5). A matriz de correlação foi transformada em figura, onde o conjunto de todas correlações foram separados por quartis e o azul mais escuro refere-se ao quartil superior. Os valores de correlação entre os valores krigados nas estações do ano foram elevados, todos acima de 0,997. Percebe-se que a correlação foi maior entre as primeiras 8 estações do ano, ou seja, os dois primeiros anos. O verão 13/14 e outono 14 são as estações que mais diferem das restantes.

Estes altos valores de correlação, também estão influenciados pela cota de instalação, pois a diferença temporal dos valores krigados ao longo de cada estação, é pequena, comparando com a magnitude dos dados.

	Outono 12	Inverno 12	Primavera 12	Verão 12/13	Outono 13	Inverno 13	Primavera 13	Verão 13/14	Outono 14	Inverno 14	Primavera 14	Verão 14/15
Outono 12	1,00000	0,99990	0,99982	0,99981	0,99992	0,99988	0,99987	0,99728	0,99729	0,99810	0,99807	0,99805
Inverno 12	0,99990	1,00000	0,99982	0,99988	0,99991	0,99988	0,99983	0,99763	0,99766	0,99838	0,99829	0,99824
Primavera 12	0,99982	0,99982	1,00000	0,99986	0,99989	0,99977	0,99983	0,99787	0,99801	0,99861	0,99863	0,99863
Verão 12/13	0,99981	0,99988	0,99986	1,00000	0,99991	0,99980	0,99977	0,99797	0,99798	0,99861	0,99857	0,99852
Outono 13	0,99992	0,99991	0,99989	0,99991	1,00000	0,99996	0,99995	0,99756	0,99764	0,99841	0,99837	0,99833
Inverno 13	0,99988	0,99988	0,99977	0,99980	0,99996	1,00000	0,99997	0,99714	0,99728	0,99815	0,99809	0,99804
Primavera 13	0,99987	0,99983	0,99983	0,99977	0,99995	0,99997	1,00000	0,99707	0,99727	0,99815	0,99814	0,99811
Verão 13/14	0,99728	0,99763	0,99787	0,99797	0,99756	0,99714	0,99707	1,00000	0,99971	0,99950	0,99944	0,99934
Outono 14	0,99729	0,99766	0,99801	0,99798	0,99764	0,99728	0,99727	0,99971	1,00000	0,99984	0,99980	0,99974
Inverno 14	0,99810	0,99838	0,99861	0,99861	0,99841	0,99815	0,99815	0,99950	0,99984	1,00000	0,99996	0,99987
Outono 14	0,99807	0,99829	0,99863	0,99857	0,99837	0,99809	0,99814	0,99944	0,99980	0,99996	1,00000	0,99997
Verão 14/15	0,99805	0,99824	0,99863	0,99852	0,99833	0,99804	0,99811	0,99934	0,99974	0,99987	0,99997	1,00000

Legenda				
de	0,99707	0,99810	0,99939	0,99988
até	0,99810	0,99939	0,99988	1,00000

Figura 3. Matriz de correlação da cota piezométrica do outono 2012 ao verão 2014/2015

2.2 Vetores TS (Spatiotemporal)

Para o estudo dos vetores de séries temporais, TS, a variável $Z(u,t)$ pode ser escrita como já visto na Eq. (1), porém, agora o vetor $Z(u,t)$ é modelado como um número finito de séries temporais, com domínio $t \in T$, correlacionadas pela sua localização e que podem ser escritas como:

$$Z(u,t) = Z(t) = [Z_u(t)] = [Z_{u_1}(t), \dots, Z_{u_n}(t)]' = [Z_1(t), \dots, Z_n(t)]' \quad (7)$$

onde n é o número de localizações espaciais. Considerou-se cada piezômetro uma realização RF e o tempo foi observado em dias. Considerou-se a data inicial 0 como 01 de janeiro de 2012 e como o começo da estação mais próxima é em 20 de março, ou seja no dia 75, os estudos e as correlações foram estudadas a partir desta data, devendo ser desconsiderado os dados do dia 0 ao 75.

Assumindo estacionariedade, a matriz de covariância $C(\tau)$ entre dados de quaisquer duas localizações separadas por um mesmo espaço de tempo τ pode ser escrita como:

$$C(\tau) = \begin{bmatrix} C_{11}(\tau) & \cdots & C_{1\beta}(\tau) & \cdots & C_{1n}(\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{\alpha 1}(\tau) & \cdots & C_{\alpha\alpha}(\tau) & \cdots & C_{\alpha n}(\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1}(\tau) & \cdots & C_{n\beta}(\tau) & \cdots & C_{nn}(\tau) \end{bmatrix} \text{ com } n = 67. \quad (8)$$

$$\text{onde } C_{\alpha\beta}(\tau) = \text{Cov}\{Z_{\alpha}(\tau), Z_{\beta}(t + \tau)\} \approx \frac{1}{T} \sum_{\alpha=1}^n [z(u_{\alpha}, t_i) - m_{\alpha.}] [z(u_{\beta}, t_i + \tau) - m_{\beta.}] \quad (9)$$

É a covariância entre os dados nas localizações u_{α} e u_{β} .

Da mesma forma que os valores da matriz de covariância $C(h)$, os valores são afetados pela sua dimensão e pela quantidade de resultados, assim, optou-se por usar a matriz de correlação, a qual usa valores de -1 à 1 para explicar a correlação, tornando assim mais fácil suas comparações, pois independe da magnitude dos resultados:

$$\rho(\tau) = \begin{bmatrix} \rho_{11}(\tau) & \cdots & \rho_{1\beta}(\tau) & \cdots & \rho_{1n}(\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{\alpha 1}(\tau) & \cdots & \rho_{\alpha\beta}(\tau) & \cdots & \rho_{\alpha n}(\tau) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1}(\tau) & \cdots & \rho_{n\beta}(\tau) & \cdots & \rho_{nn}(\tau) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\text{onde } \rho_{\alpha\beta}(\tau) = \frac{C_{\alpha\beta}(\tau)}{\sigma_{\alpha}\sigma_{\beta}} \quad (11)$$

Antes de ser feita a análise de correlação, estudou-se a variação temporal das cotas piezométricas, onde alguns fatos importantes foram detectados e analisados a seguir.

As Figuras 4 e 5 mostram a variação da cota piezométrica ao longo dos dias para alguns dos piezômetros em estudo que tiveram maior correlação. Aqui destaca-se uma diminuição da cota piezométrica entre os dias 710 e 746, e que coincidem com período de longa estiagem, onde o nível do reservatório chegou à 216 msnm (metros sobre o nível do mar), quando os níveis de operação normal são de 219,0 à 220,50 msnm. Essa diminuição nas cotas piezométricas foram sentidas por muitos instrumentos, porém, em alguns essa diminuição foi pequena ou quase imperceptível, provavelmente por ser em lugares onde a subpressão já era baixa, assim, o que permaneceu é a cota de instalação.

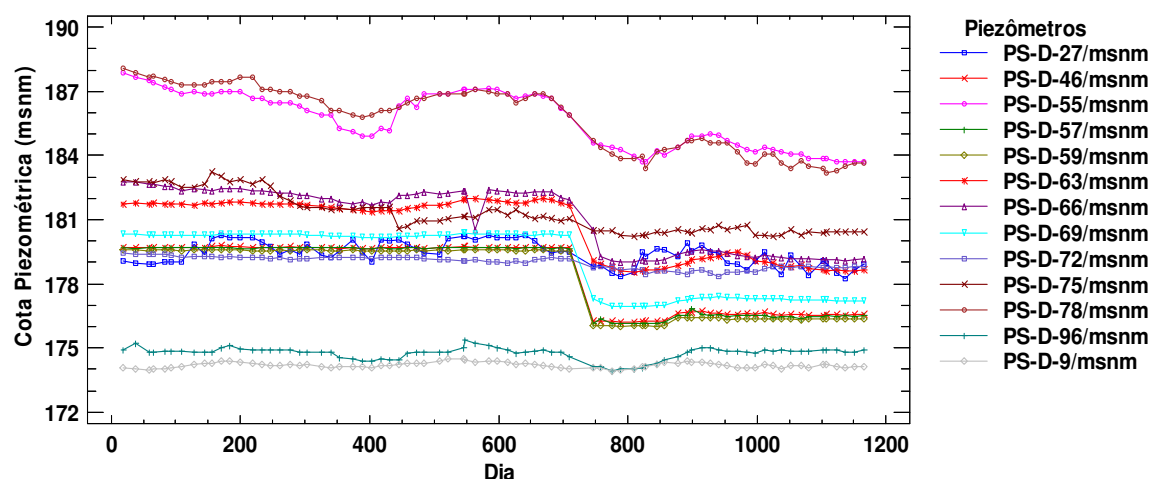


Figura 4. Séries temporais das cotas piezométricas do verão de 01/01/2012 (0) à 21/03/2015 (1166)

Ainda na Fig. 4 pode-se observar que alguns piezômetros tiveram comportamento mais semelhante, como é o caso dos piezômetros PS-D-55/msnm e PS-D-78/msnm, bem como os instrumentos PS-D-96/msnm e PS-D-9/msnm, os quais tiveram pouca variabilidade.

Durante o estudo das séries temporais dos piezômetros, percebeu-se que a magnitude dos dados influencia na análise das mesmas, pois, alguns piezômetros que pareciam ter pouca ou nenhuma variação, comparando com o todo, ao serem analisados separadamente, essa variação mostrou-se significativa. Ainda foi possível visualizar comportamentos sazonais em alguns piezômetros como o PS-D130/msnm, PS-D139/msnm e PS-D146/msnm, mostrados na Fig. 5.

Alguns piezômetros tiveram comportamento semelhante, mostrando serem altamente correlacionados, como é o caso dos piezômetros PS-D81/msnm, PS-D91/msnm, PS-D84/msnm, PS-D93/msnm e PS-D99/msnm. Na investigação espacial destes, percebeu-se que são instrumentos instalados em locais próximos e sob as mesmas condições, como o caso dos piezômetros PS-D130/msnm, PS-D139/msnm e PS-D146/msnm, que estão instalados a montante da cortina de injeção. A mesma diminuição da cota piezométrica entre os dias 710 e 746 mostrada na Fig. 4 pode ser vista na Fig. 5.

A matriz de covariância para estas séries temporais, foi colocada em forma de figura, sendo analisadas separadamente pelos blocos A, D e E. O bloco D, devido a maior quantidade de instrumentos instalados, necessitou ser dividida em duas partes.

Para mensurar estas correlações espaço-temporais, usou-se a Eq. (9), com um lag de tempo de $\tau = 15$ dias, a qual gerou uma matriz de covariância de tamanho $C(\tau)_{67 \times 67}$, e que foi usada para determinar a matriz de correlação dada pela Eq. (10).

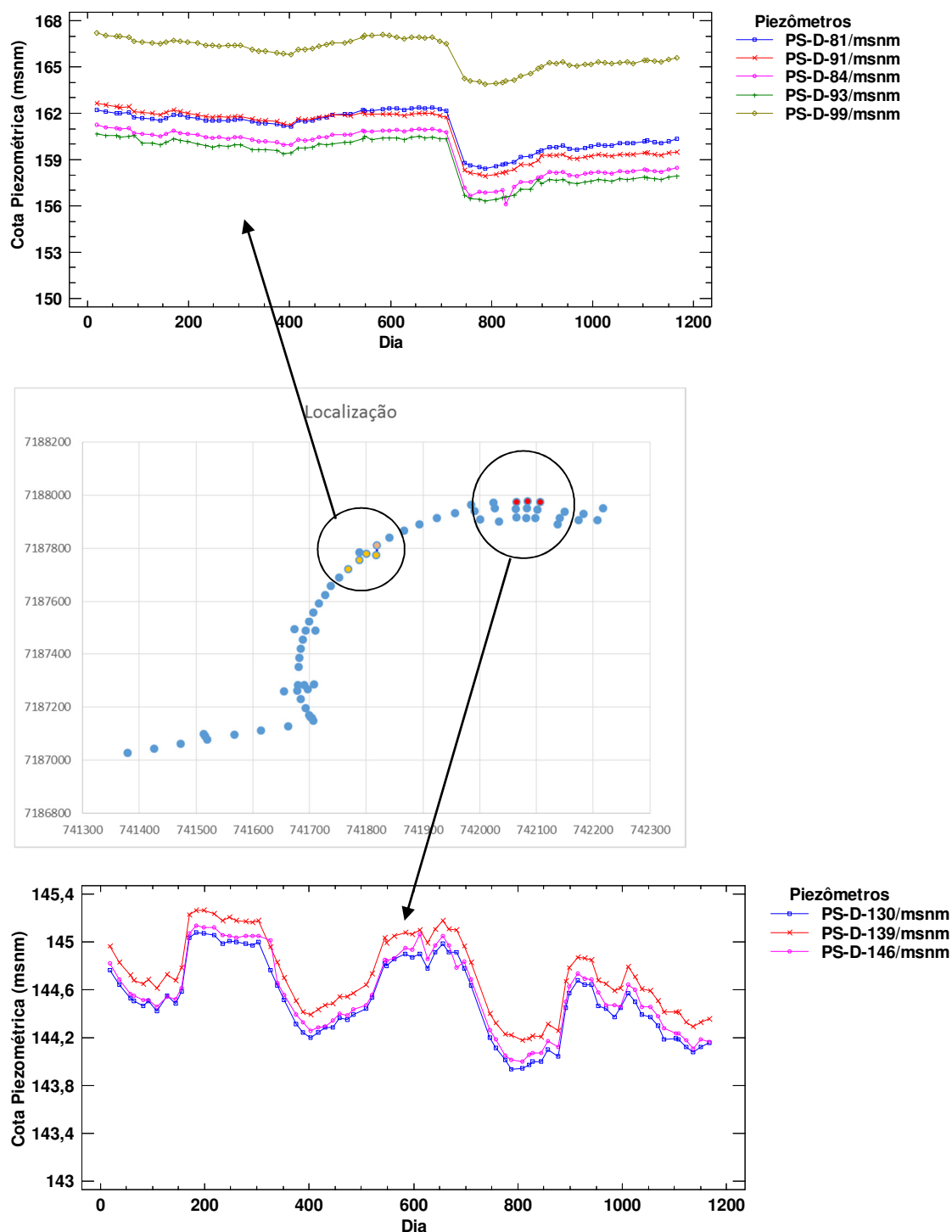


Figura 5. Séries temporais das cotas piezométricas com maior semelhança

Para uma melhor visualização, a matriz $C(\tau)$ é apresentada em três partes, onde a primeira mostra as correlações nos blocos A e E, e a segunda e terceira parte, as correlações no bloco D, onde situa-se a maior quantidade de instrumentos em estudo.

A Figura 6 representa o diagrama de divisão usado para a apresentação da tabela.

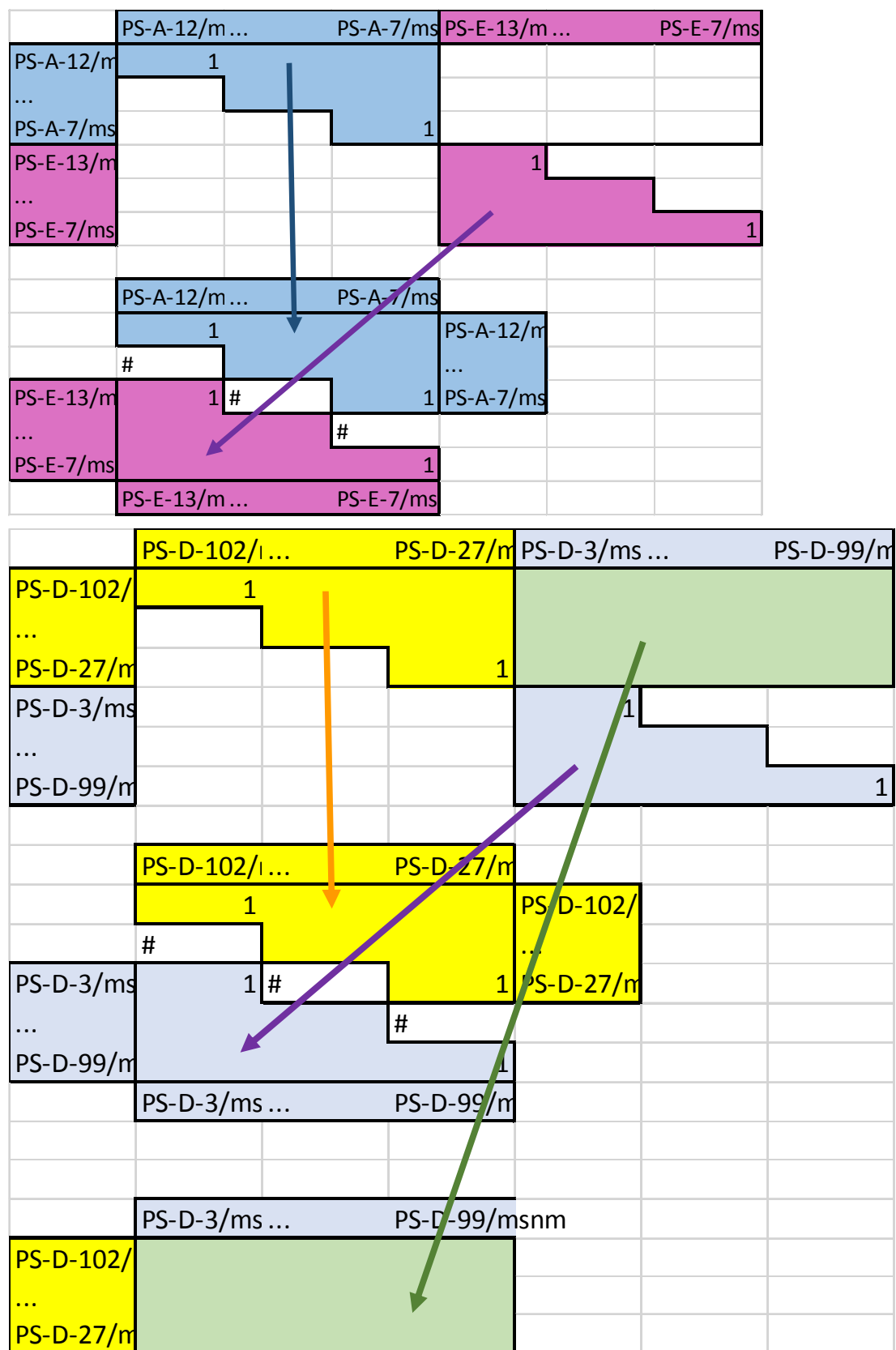


Figura 6. Diagrama da divisão da matriz de correlação para todos os piezômetros, separados de acordo com o bloco de instalação

	PS-A-12/n	PS-A-18/n	PS-A-20/n	PS-A-22/n	PS-A-26/n	PS-A-3/m	PS-A-31/n	PS-A-36/n	PS-A-42/n	PS-A-44/n	PS-A-46/n	PS-A-7/msnm	
	1,000	-0,775	0,212	0,693	0,960	0,108	0,880	-0,949	0,210	0,689	0,536	0,966	PS-A-12/msnm
#		1,000	-0,370	-0,885	-0,806	-0,393	-0,821	0,891	-0,321	-0,801	-0,625	-0,860	PS-A-18/msnm
#	#		1,000	0,445	0,257	0,232	0,401	-0,241	0,584	0,512	0,604	0,248	PS-A-20/msnm
#	#	#		1,000	0,813	0,529	0,877	-0,821	0,215	0,903	0,553	0,819	PS-A-22/msnm
#	#	#	#		1,000	0,302	0,951	-0,949	0,154	0,771	0,507	0,980	PS-A-26/msnm
PS-E-13/m	1,000	#	#	#	#	1,000	0,377	-0,270	0,065	0,457	0,232	0,283	PS-A-3/msnm
PS-E-15/m	-0,037	1,000	#	#	#	#	1,000	-0,880	0,300	0,839	0,618	0,921	PS-A-31/msnm
PS-E-26/m	0,637	0,100	1,000	#	#	#	#	1,000	-0,153	-0,753	-0,515	-0,986	PS-A-36/msnm
PS-E-29/m	0,924	-0,015	0,752	1,000	#	#	#	#	1,000	0,230	0,874	0,163	PS-A-42/msnm
PS-E-3/ms	-0,363	0,132	-0,084	-0,207	1,000	#	#	#	#	1,000	0,560	0,761	PS-A-44/msnm
PS-E-5/ms	0,271	0,188	0,416	0,173	-0,171	1,000	#	#	#	#	1,000	0,523	PS-A-46/msnm
PS-E-7/ms	-0,055	0,324	0,152	0,059	0,715	0,030	1,000	#	#	#	#	1,000	PS-A-7/msnm
	PS-E-13/m	PS-E-15/m	PS-E-26/m	PS-E-29/m	PS-E-3/ms	PS-E-5/ms	PS-E-7/msnm						

Legenda				
de	-0,9864	0,0058	0,3566	0,6662
até	0,0058	0,3566	0,6662	1,0000

Figura 7. Matriz de autocorrelação da cota piezométrica dos instrumentos instalados ao longo dos blocos A e E

	PS-D-102/ms	D-105/ms	D-108/ms	D-111/ms	D-114/ms	D-116/ms	D-118/ms	D-123/ms	D-125/ms	D-127/ms	D-130/ms	D-132/ms	D-134/ms	D-139/ms	D-14/ms	D-141/ms	D-143/ms	D-146/ms	D-148/ms	D-150/ms	D-16/ms	D-18/ms	D-24/ms	D-27/ms	nm
	1,000	0,684	0,544	0,812	0,604	-0,164	-0,195	0,620	0,716	-0,021	0,691	0,317	0,398	0,671	0,089	0,820	0,149	0,660	0,541	0,424	0,142	-0,043	0,639	0,481	PS-D-102/n
	#	1,000	0,683	0,787	0,614	-0,093	0,002	0,606	0,484	0,199	0,643	0,260	0,472	0,631	0,163	0,623	0,351	0,617	0,134	0,046	0,254	0,101	0,506	0,537	PS-D-105/n
S-D-3/msr	1,000	#	1,000	0,755	0,306	-0,231	0,389	0,321	0,324	0,403	0,733	0,196	0,560	0,729	0,231	0,484	0,537	0,712	-0,094	-0,090	0,246	0,499	0,334	0,751	PS-D-108/n
-D-30/ms	-0,787	1,000	#	1,000	0,681	-0,165	0,051	0,643	0,659	0,154	0,879	0,356	0,594	0,868	0,120	0,796	0,363	0,864	0,250	0,073	0,244	0,155	0,632	0,638	PS-D-111/n
-D-38/ms	-0,006	0,022	1,000	#	1,000	0,292	-0,207	0,680	0,467	-0,105	0,406	0,342	0,341	0,389	0,021	0,539	0,094	0,399	0,410	0,040	0,299	-0,230	0,649	0,232	PS-D-114/n
-D-42/ms	0,526	-0,423	0,797	1,000	#	1,000	-0,225	0,254	-0,021	-0,386	-0,372	0,310	0,030	-0,387	-0,118	-0,092	-0,032	-0,390	0,277	0,198	0,206	-0,289	0,295	-0,243	PS-D-116/n
-D-46/ms	0,867	-0,692	0,154	0,688	1,000	#	1,000	-0,564	-0,537	0,735	0,149	-0,391	0,053	0,162	0,123	-0,413	0,442	0,146	-0,670	-0,474	0,096	0,608	-0,489	0,202	PS-D-118/n
-D-50/ms	0,517	-0,604	0,270	0,479	0,417	1,000	#	1,000	0,771	-0,432	0,380	0,516	0,460	0,363	0,069	0,772	0,154	0,362	0,594	0,287	0,167	-0,275	0,893	0,406	PS-D-123/n
-D-55/ms	0,841	-0,710	0,169	0,663	0,890	0,556	1,000	#	1,000	-0,466	0,649	0,662	0,538	0,633	0,002	0,964	0,140	0,636	0,687	0,597	0,071	-0,206	0,806	0,455	PS-D-125/n
-D-57/ms	0,868	-0,693	0,145	0,680	1,000	0,415	0,888	1,000	#	1,000	0,246	-0,455	-0,034	0,257	0,113	-0,268	0,329	0,248	-0,544	-0,499	0,100	0,503	-0,531	0,137	PS-D-127/n
-D-59/ms	0,867	-0,690	0,144	0,680	1,000	0,409	0,887	1,000	1,000	#	1,000	0,347	0,550	0,999	0,098	0,781	0,381	0,992	0,153	0,179	0,169	0,234	0,410	0,609	PS-D-130/n
S-D-6/msr	-0,276	0,595	0,026	-0,159	-0,267	-0,198	-0,306	-0,268	-0,265	1,000	#	1,000	0,528	0,336	-0,024	0,619	0,207	0,360	0,510	0,493	0,103	-0,159	0,673	0,286	PS-D-132/n
-D-63/ms	0,881	-0,696	0,190	0,712	0,991	0,438	0,921	0,990	0,990	-0,286	1,000	#	1,000	0,536	0,075	0,570	0,634	0,551	0,147	0,108	0,249	0,191	0,549	0,643	PS-D-134/n
-D-66/ms	0,899	-0,729	0,121	0,659	0,976	0,465	0,924	0,975	0,975	-0,290	0,978	1,000	#	1,000	0,098	0,766	0,381	0,993	0,132	0,163	0,164	0,242	0,391	0,601	PS-D-139/n
-D-69/ms	0,874	-0,692	0,150	0,685	0,999	0,409	0,897	0,999	0,999	-0,267	0,994	0,979	1,000	#	1,000	0,046	0,249	0,094	-0,046	-0,111	0,030	0,128	0,067	0,162	PS-D-14/ms
-D-72/ms	0,850	-0,708	-0,129	0,441	0,915	0,313	0,804	0,917	0,918	-0,263	0,887	0,907	0,916	1,000	#	1,000	0,222	0,767	0,615	0,528	0,132	-0,128	0,780	0,522	PS-D-141/n
-D-75/ms	0,831	-0,798	-0,066	0,427	0,749	0,558	0,771	0,747	0,748	-0,331	0,751	0,791	0,751	0,789	1,000	#	1,000	0,376	-0,152	-0,013	0,245	0,346	0,217	0,521	PS-D-143/n
-D-78/ms	0,913	-0,775	0,147	0,667	0,935	0,585	0,967	0,934	0,934	-0,324	0,953	0,961	0,940	0,868	0,845	1,000	#	1,000	0,149	0,146	0,179	0,245	0,390	0,600	PS-D-146/n
-D-81/ms	0,716	-0,553	0,217	0,703	0,940	0,315	0,873	0,937	0,938	-0,188	0,934	0,911	0,939	0,852	0,668	0,866	1,000	#	1,000	0,680	0,176	-0,466	0,623	0,010	PS-D-148/n
-D-84/ms	0,782	-0,630	0,183	0,697	0,965	0,383	0,901	0,963	0,964	-0,226	0,959	0,945	0,965	0,892	0,736	0,912	0,989	1,000	#	1,000	0,025	-0,427	0,414	-0,066	PS-D-150/n
-D-89/ms	0,897	-0,779	0,172	0,686	0,927	0,597	0,966	0,926	0,924	-0,319	0,947	0,952	0,931	0,849	0,826	0,983	0,874	0,912	1,000	#	1,000	-0,080	0,133	0,091	PS-D-16/ms
S-D-9/msr	0,072	-0,102	0,730	0,672	0,243	0,443	0,319	0,235	0,233	0,038	0,257	0,226	0,238	0,007	0,275	0,299	0,271	0,280	1,000	#	1,000	-0,240	0,567	0,456	PS-D-18/ms
-D-91/ms	0,821	-0,673	0,154	0,685	0,977	0,414	0,911	0,975	0,976	-0,245	0,969	0,960	0,976	0,912	0,775	0,931	0,979	0,993	0,933	0,258	1,000	#	1,000	0,456	PS-D-24/ms
-D-93/ms	0,792	-0,634	0,183	0,700	0,969	0,395	0,908	0,967	0,968	-0,226	0,964	0,950	0,969	0,889	0,739	0,917	0,990	0,996	0,920	0,277	0,995	1,000	#	1,000	PS-D-27/ms
-D-96/ms	0,178	-0,141	0,339	0,490	0,362	0,251	0,472	0,353	0,354	0,028	0,381	0,338	0,361	0,266	0,338	0,381	0,581	0,534	0,421	0,477	0,509	0,530	1,000	#	
-D-99/ms	0,691	-0,553	0,208	0,682	0,901	0,357	0,887	0,897	0,899	-0,181	0,902	0,883	0,902	0,822	0,693	0,862	0,988	0,976	0,875	0,318	0,965	0,976	0,666	1,000	
	PS-D-3/msr	D-30/ms	D-38/ms	D-42/ms	D-46/ms	D-50/ms	D-55/ms	D-57/ms	D-59/ms	S-D-6/msr	D-63/ms	D-66/ms	D-69/ms	D-72/ms	D-75/ms	D-78/ms	D-81/ms	D-84/ms	D-89/ms	S-D-9/msr	D-91/ms	D-93/ms	D-96/ms	D-99/ms	nm

Legenda				
de	-0,9864	0,0058	0,3566	0,6662
até	0,0058	0,3566	0,6662	1,0000

(continua na próxima página)

	PS-D-3/msr	D-30/ms	D-38/ms	D-42/ms	D-46/ms	D-50/ms	D-55/ms	D-57/ms	D-59/ms	D-6/msr	D-63/ms	D-66/ms	D-69/ms	D-72/ms	D-75/ms	D-78/ms	D-81/ms	D-84/ms	D-89/ms	D-9/msr	D-91/ms	D-93/ms	D-96/ms	D-99/ms
D-102/ms	0,733	-0,615	0,133	0,639	0,907	0,383	0,889	0,903	0,905	-0,213	0,901	0,898	0,906	0,864	0,759	0,880	0,974	0,976	0,891	0,231	0,974	0,976	0,618	0,985
D-105/ms	0,653	-0,398	0,292	0,655	0,743	0,328	0,768	0,745	0,741	-0,131	0,779	0,743	0,753	0,615	0,376	0,741	0,747	0,745	0,749	0,311	0,729	0,749	0,361	0,721
D-108/ms	0,398	-0,177	0,670	0,813	0,574	0,337	0,604	0,568	0,567	0,008	0,613	0,558	0,576	0,317	0,239	0,550	0,637	0,616	0,572	0,585	0,572	0,613	0,470	0,617
D-111/ms	0,717	-0,469	0,349	0,757	0,860	0,239	0,817	0,856	0,857	-0,187	0,887	0,841	0,868	0,707	0,562	0,809	0,889	0,876	0,818	0,314	0,857	0,878	0,495	0,862
D-114/ms	0,612	-0,336	-0,122	0,294	0,680	-0,102	0,533	0,684	0,684	-0,092	0,655	0,668	0,687	0,734	0,350	0,570	0,662	0,655	0,557	-0,150	0,653	0,659	0,090	0,602
D-116/ms	0,050	0,058	-0,335	-0,302	-0,024	-0,290	-0,214	-0,017	-0,016	0,024	-0,063	-0,029	-0,029	0,087	-0,099	-0,113	-0,151	-0,132	-0,129	-0,498	-0,105	-0,117	-0,580	-0,228
D-118/ms	-0,528	0,571	0,598	0,235	-0,307	-0,259	-0,298	-0,313	-0,314	0,297	-0,285	-0,367	-0,309	-0,491	-0,571	-0,392	-0,095	-0,187	-0,345	0,426	-0,255	-0,195	0,323	-0,089
D-123/ms	0,876	-0,697	-0,107	0,391	0,840	0,337	0,752	0,845	0,844	-0,285	0,839	0,855	0,847	0,833	0,664	0,827	0,657	0,715	0,788	-0,004	0,746	0,726	-0,098	0,594
D-125/ms	0,922	-0,797	0,012	0,514	0,816	0,545	0,791	0,815	0,816	-0,319	0,817	0,846	0,820	0,820	0,920	0,884	0,674	0,748	0,859	0,135	0,794	0,752	0,264	0,668
D-127/ms	-0,357	0,400	0,532	0,280	-0,177	-0,188	-0,059	-0,185	-0,184	0,111	-0,117	-0,197	-0,172	-0,368	-0,463	-0,200	0,041	-0,046	-0,152	0,302	-0,107	-0,053	0,401	0,071
D-130/ms	0,617	-0,423	0,453	0,749	0,661	0,386	0,732	0,654	0,653	-0,180	0,710	0,667	0,670	0,491	0,568	0,707	0,718	0,713	0,731	0,408	0,699	0,713	0,666	0,742
D-132/ms	0,623	-0,509	0,006	0,296	0,449	0,233	0,416	0,449	0,451	-0,146	0,448	0,473	0,453	0,446	0,514	0,508	0,293	0,352	0,489	0,022	0,402	0,363	-0,014	0,257
D-134/ms	0,520	-0,354	0,416	0,642	0,598	0,375	0,426	0,596	0,594	-0,037	0,588	0,544	0,593	0,414	0,289	0,515	0,493	0,516	0,510	0,452	0,524	0,516	0,218	0,436
D-139/ms	0,598	-0,408	0,456	0,739	0,640	0,379	0,719	0,632	0,632	-0,179	0,690	0,646	0,649	0,468	0,552	0,690	0,699	0,693	0,713	0,412	0,678	0,694	0,664	0,725
D-14/ms	0,064	-0,009	0,124	0,110	0,096	0,081	0,127	0,095	0,093	0,031	0,114	0,100	0,098	0,041	-0,013	0,086	0,116	0,103	0,091	0,230	0,093	0,118	0,259	0,136
D-141/ms	0,934	-0,774	0,104	0,620	0,883	0,536	0,887	0,881	0,881	-0,311	0,899	0,907	0,889	0,837	0,890	0,942	0,793	0,848	0,931	0,190	0,878	0,852	0,398	0,793
D-143/ms	0,153	-0,043	0,561	0,532	0,263	0,189	0,214	0,259	0,258	0,109	0,276	0,219	0,262	0,068	-0,066	0,210	0,251	0,232	0,229	0,591	0,223	0,235	0,257	0,228
D-146/ms	0,605	-0,408	0,451	0,733	0,637	0,372	0,705	0,630	0,630	-0,154	0,686	0,644	0,646	0,465	0,548	0,683	0,691	0,686	0,705	0,405	0,672	0,685	0,653	0,712
D-148/ms	0,624	-0,566	-0,358	0,054	0,531	0,235	0,494	0,531	0,536	-0,068	0,501	0,564	0,531	0,689	0,727	0,580	0,439	0,502	0,542	-0,243	0,548	0,506	0,068	0,446
D-150/ms	0,459	-0,483	-0,302	0,016	0,318	0,408	0,398	0,319	0,320	-0,126	0,302	0,361	0,316	0,461	0,670	0,442	0,272	0,334	0,441	-0,098	0,387	0,339	0,251	0,326
D-16/ms	0,141	0,361	0,045	0,093	0,168	-0,092	0,113	0,168	0,171	0,694	0,168	0,159	0,174	0,116	-0,022	0,121	0,188	0,168	0,098	-0,020	0,158	0,171	0,065	0,175
D-18/ms	-0,217	0,186	0,791	0,544	-0,036	0,070	-0,063	-0,045	-0,046	0,066	-0,013	-0,087	-0,044	-0,268	-0,225	-0,095	0,047	0,000	-0,047	0,583	-0,037	-0,001	0,224	0,028
D-24/ms	0,832	-0,672	-0,068	0,420	0,825	0,325	0,692	0,827	0,828	-0,232	0,799	0,817	0,824	0,835	0,699	0,789	0,669	0,717	0,755	0,093	0,753	0,728	0,009	0,608
D-27/ms	0,460	-0,380	0,786	0,925	0,605	0,522	0,560	0,598	0,596	-0,106	0,617	0,573	0,600	0,351	0,350	0,582	0,568	0,567	0,585	0,740	0,562	0,577	0,313	0,535

Legenda				
de	-0,9864	0,0058	0,3566	0,6662
até	0,0058	0,3566	0,6662	1,0000

Figura 8. Matriz de correlação da cota piezométrica dos instrumentos instalados ao longo do bloco D

As Figuras 7 e 8 revelam que as maiores correlações temporais encontram-se entre os piezômetros do bloco D, enquanto a região dos blocos A e E tiveram comportamento heterogêneo.

Diferente das correlações espaciais dos vetores RF, dadas pela matriz de correlação mostrada na Fig. 4, as quais foram muito altas, as correlações dos vetores TS tiveram maior variabilidade, tendo valores de -0,986, dada pelos piezômetros PS-A7/mnsm e PS-A36/mnsm à 0,999, porém, mais de 50% das correlações estiveram acima de 0,3566 e 25% das correlações estão entre -0,986 e 0,058.

3 CONCLUSÃO

Este estudo mostrou duas maneiras de analisar a variação espaço temporal das cotas piezométricas. Observou-se que as correlações dadas pelos vetores RF foram altas e sem variações, isso ocorreu pois os valores são muito afetados pela sua magnitude. Como a variação está na subpressão exercida pela água, a cota piezométrica terá pouco coeficiente de variação, dada que a cota de instalação é constante e a variabilidade da subpressão é pequena, se comparada a magnitude da cota piezométrica. Outro fator que influencia neste estudo, é o intervalo de tempo estudado. Por uma questão de quantidade de mapas, optou-se por usar médias das estações do ano, isso diminui a gama de mapas, mas mascarou a variabilidade temporal das cotas piezométricas, havendo uma suavização destas.

O estudo através dos vetores TS mostraram maiores variações nas correlações. Nele foi possível visualizar piezômetros com comportamento semelhante, bem como, aqueles que destoam do restante. Observou-se que a região do bloco D foi a que obteve comportamento mais semelhante. Para alguns vetores, este comportamento foi idêntico.

Os vetores RF tiveram todos alta correlação, isso ocorreu em função da magnitude dos dados, que variam de 120 à 190 msnm, e a variação nas subpressões são de até 30 msnm.

Para este caso, os vetores TS tiveram melhor desempenho, pois os resultados mostraram maior variabilidade nas correlações.

Estudos futuros deverão ser feitos, usando como variável de estudo a carga hidráulica dos piezômetros e em diferentes intervalos de tempo.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos ao professor Dr. Jorge Kazuo Yamamoto e a Dra. Josiele Patias pela colaboração e ensinamentos.

REFERÊNCIAS

Itaipu Binacional, 2008. Usina Hidrelétrica de Itaipu - Aspectos Técnicos de Estruturas Cíveis. *Foz o Iguaçu: Superintendência de Engenharia - Diretoria Técnica.*

Itaipu Binacional, 2009. *Itaipu: usina hidreletrica - projeto: aspectos de engenharia*. Foz do Iguaçu, Paraná.

Kyriakidis, P. C. & Journel, A. G., 1999. Geoestatistical Space-Time Models: A Review. *Mathematical Geology*, California, vol. 31, pp. 651–684.

Patias, J., 2010. *Zoneamento geotécnico com base em krigagem ordinária e equações multiquádricas: Barragem de Itaipu*. Tese (Doutorado em Ciências) do Programa de Pós Graduação em Geotecnia/São Carlos.

Yamamoto, J. K., 1997. Convex_hull - a pascal program for determining the convex hull for planar sets. *Computers & Geoscience*, Elmsford, vol. 23, n. 7, pp. 725–738.