

TEMPO DE TRÂNSITO DA ÁGUA NO CARSTE: COLOMBO (PR, BRASIL)**TRANSIT TIME OF WATER IN KARST: COLOMBO (PR, BRAZIL)****Paulo Cesar Soares (1) & Daniel Fabian Bettu (2)**

(1) Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba PR.

(2) Depto. Engenharia de Petróleo, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), Balneário Camboriú, SC.

Contatos: p_soares@terra.com.br; daniel.bettu@udesc.br.**Resumo**

O tempo de trânsito da água em terrenos cársticos é extremamente variável e relevante para o aproveitamento deste recurso. Para esta estimativa, a técnica do correlograma foi testada, comparando duas séries temporais descontínuas: precipitação atmosférica e produção de poços em terrenos cársticos de elevada complexidade. A situação investigada ocorre no interflúvio Alto Iguaçu-Ribeira (Paraná, sul do Brasil), a norte de Curitiba, em áreas de ocorrência do Grupo Açungui. Duas séries temporais pré-existent de medidas de precipitação e de nível dinâmico (ND) e vazão em poços foram investigadas para avaliar o tempo de trânsito da água neste terreno. O caráter metamórfico dos calcários dolomíticos organizados em faixas NE, confinados por filitos e interceptados por diques de direção NW, o fraturamento e um epicarste encoberto são particularidades, os que tornam singular o carste desta região. A comparação da precipitação e de variação do ND (em vazão constante) em poços não revela correlação. Uma série de transformações é investigada, obtendo-se resultados satisfatórios e robustos, que indicam pulsos de recarga relacionados aos picos de precipitação, com retardo variável. O procedimento revela poços afetados imediatamente pela precipitação, com retardo de 1 a 5 dias; poços dependentes no médio prazo (5 a 10 dias) e outros dependentes no longo prazo (até 90 dias). No primeiro caso, interpretam-se entradas diretas ao aquífero no epicarste, provavelmente, por cavidades conectadas com a superfície. Outros poços mostram que o ND reage de imediato com a chuva e, adicionalmente, recebem contínuo e progressivo afluxo de água. Correlações com elevado retardo implicam no afluxo difuso de outras fontes do carste, através de zonas de fratura.

Palavras-Chave: carste; recarga de aquífero; séries temporais; Grupo Açungui.**Abstract**

The transit time of water in karst systems is extremely variable and relevant for their exploitation. To estimate this property, the correlogram technique was tested, comparing some discontinuous time series, precipitation and well yield, in karst terrain of high complexity. The investigated area is the karst of the Alto Iguaçu-Ribeira watershed (southern Brazil, north of Curitiba). The metamorphic character and intense fracture is a peculiar condition of dolomite limestone occurring in narrow northeast strips. They are confined by phillite and intercepted by northwest diabase dykes. The existence of an epikarst, hidden by superficial formations, adds particularities which give unique character to the karst of this region. The comparison of the precipitation and variation of the dynamic (piezometric) level curves for a constant productivity in four wells investigated does not reveal an evident correlation. Variable transformations and methodological adjusting were adopted reaching robust results, which indicate pulses of recharge lags with reference to the precipitation picks: short lags (1 to 5 days), medium lags (5 to 10 days), and long lags were discriminated. Wells productivity immediately dependent from precipitation been interpreted as direct entrances to the aquifer in the epikarst, probably through surface connected cavities. Others wells show that dynamic level reacts immediately with the rain event, but maintain continuous and progressive intake of water. Long term flow lags, up to 90 days, reflect entrances and diffuse flow from others sources of karst related to fractured zones.

Key-Words: karst; aquifer recharge; time series correlation; Açungui Group.**1. INTRODUÇÃO**

O tempo de trânsito da água em terrenos cársticos é significativo em termos de

aproveitamento dos recursos hídricos do sistema, tanto pela capacidade de depuração da água ao longo do subsistema de fluxo subterrâneo, como pela relação com zonas de recarga (FORD; WILLIAMS,

2007). Diversos métodos têm sido utilizados para determinação do tempo de trânsito da água em diferentes meios. Dentre os mais frequentes situa-se a comparação de duas séries temporais (BOX; JENKINS, 1976): uma correspondente à entrada no sistema aquífero (como a precipitação) e outra correspondente à saída (como, por exemplo, a produção em poço ou fonte). Para estes estudos, duas técnicas têm sido utilizadas: a da análise estatística de covariância e correlação cruzada no domínio tempo (DROGUE, 1972; HURST et al, 1975; NETO et al, 2015); e a da análise espectral no domínio frequência (LAROCQUE et al, 1998; PADILLA; PULIDO-BOSCH, 1995).

As investigações do tempo de residência da água em aquíferos e no solo também tem se beneficiado, há várias décadas, das investigações isotópicas, tanto de isótopos radioativos, como o trítio e carbono 14, para águas recentes (CLARK; FRITZ 1997; AGGARWAL et al, 1998), como de comparação com séries temporais de variações da razão entre isótopos estáveis leves e pesados ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e Hidrogênio/Deutério) (Jordan; Froehlich 1990).

No carste de Colombo, HARUM et al, (2000) utilizaram isótopos de trítio para determinar o tempo de residência da água do terreno cárstico aqui investigado, encontrando valores de 13 a 20 anos, contraditório com o fato das águas não estarem saturadas em carbonatos (baixo índice de saturação da calcita e da dolomita). Este tipo de contradição foi considerado o paradoxo da idade das águas subterrâneas (Bethke & Johnson 2001), pois uma idade isotópica elevada pode resultar da mistura de

águas providas dos aquíferos, com um volume muito superior ao dos aquíferos, mas com uma taxa de transferência, mistura e renovação muito lenta, comparativamente à dos aquíferos e seus meios de recarga. Esta presença de águas com elevado tempo de residência e trânsito poderia explicar as contradições do balanço hídrico, conforme sugerido por VESTENA; KOBAYAMA (2007).

Por outro lado, métodos de comparação entre a disponibilidade hídrica superficial e a recarga dos aquíferos, tanto no domínio “tempo” como no domínio “frequência”, apresentam resultados diretos de indicadores de recarga e, então, do tempo de trânsito da água, desde que se trate de meios homogêneos, como verificado por Neto et al, 2015. As técnicas do correlograma ou do variograma cruzados apresentam bons resultados na comparação de duas séries temporais ou espaciais contínuas (Fig. 1) e homólogas. Tais técnicas têm sido usadas para correlacionar também simples variações na temperatura da água na superfície e na saída do sistema (BAILLY-COMTE et al, 2011). São utilizadas também para comparar variações nos padrões químicos e em traçadores naturais, neste caso utilizando procedimentos mais trabalhosos e custosos de aquisição de dados. Considerando que os sistemas aquíferos do carste são complexos, em especial em carste de terrenos metamórficos, em virtude de diferentes meios de percolação (solo, sedimentos e cavernas do epicarste e fraturas no endocarste), é esperada a emergência de dificuldades incomuns nos meios heterogêneos anisotrópicos e fraturados, diferentemente dos meios porosos homogêneos.

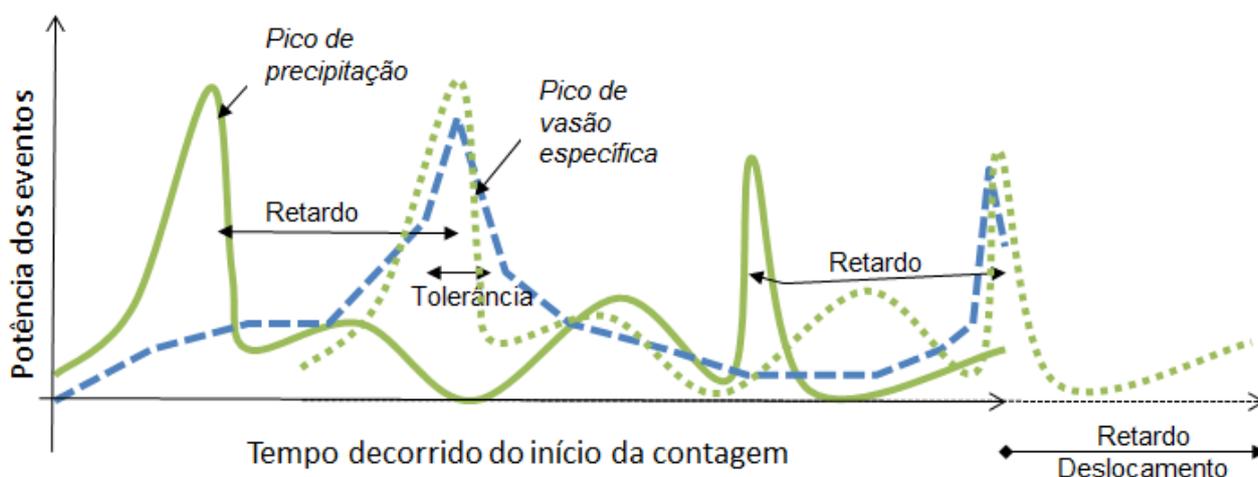


Figura 1 – Representação conceitual da relação esperada na comparação das séries temporais de vazão com precipitação para um sistema, com deslocamento da série entrada (precipitação, verde pontilhado) até encontrar o retardo (passo de deslocamento) que apresenta melhor ajuste com a série saída (vazão), ou seja com maior correlação entre a potência dos eventos. A correlação convencional é medida pelo coeficiente r dado pela razão entre a covariância das variáveis P e V e o produto dos desvios padrões de P e de V.

Tem sido considerado conveniente que o período de observação envolva diversos ciclos, pelo menos três, em virtude da existência de uma estação seca e outra chuvosa. No caso investigado, dispõe-se de pouco mais de um ano, apenas. Entretanto, considera-se um período suficiente em vista da condição climática regional de elevada pluviosidade em todas as estações (clima Cfb de Köppen). De qualquer, forma o intervalo de correlação cruzada máximo considerado foi de 100 dias, inferior a um terço do período.

A tomada e registro de medidas de variação temporal do nível dinâmico (ND) e da vazão (Q) em poços do terreno cárstico de Colombo (Rosa Filho *et al.*, 2002), permitiu avaliar a funcionalidade do correlograma na estimativa do tempo de trânsito da água neste tipo de terreno. Entretanto, as medidas não foram tomadas de forma contínua, intercalando períodos longos sem valor. Esta periodicidade na leitura constitui um problema a mais na análise e na interpretação das séries temporais para comparação com séries regulares de dados pluviométricos, pois neste caso não se trata de amostragem regular, nem aleatória, exigindo procedimentos de regularização. Esta característica dos dados de vazão é impeditiva para o uso de análise espectral, no domínio "frequência". Entretanto, no domínio "tempo", procedimentos diversos da geoestatística como o de regularização fornecem resultados robustos.

Por outro lado, embora de leitura periódica, os dados pluviométricos apresentam excepcional irregularidade na distribuição temporal e na amplitude, exigindo um esforço investigativo para comparar as duas séries, tendo em vista:

- Ω A elevada variabilidade dos dados de pluviometria;
- Ω O tipo de distribuição dos dados, tendendo para log-normal no caso da pluviometria;
- Ω As possíveis tendências sazonais presentes nas séries pluviométricas;
- Ω As tendências presentes nas séries de dados de nível dinâmico ou de vazão;
- Ω A existência de valores anômalos, inesperados, ou gerados operacionalmente durante a produção.

Entretanto, em casos reais, diversas características do terreno e propriedades dos eventos geram perturbações na relação entre entrada e saída de sistemas naturais, de tal forma que a comparação das curvas reais de precipitação (P, mm/dia) e da vazão específica (VE, m³/(h.m)), não revela uma evidente correlação entre si. Isto se torna bem evidente no caso estudado, com aparente ausência de

relação entre precipitação e vazão, em virtude das particularidades das variáveis, das complexidades do terreno cárstico, em especial sobre rochas metamórficas, e da forma de coleta dos dados disponíveis. Diante desta aparente contradição, o problema que se coloca é o da aplicabilidade da correlação cruzada na estimativa do tempo de trânsito da água no epicarste coberto e no endocarste, ou seja, como revelar e validar esta relação, se existente.

Em virtude destas dificuldades, o objetivo deste trabalho é testar e avaliar transformações realizáveis e válidas nas duas variáveis de forma tal que a comparação estatística permita identificar o tempo de retardo como sendo aquele para o qual ocorre maior correlação significativa, considerando este como o tempo de transito da água entre a superfície e a entrada de água no poço, a uma profundidade conhecida.

2. O CARSTE DE COLOMBO-FERVIDA

Os terrenos cársticos do interflúvio Alto Iguaçu-Ribeira (Açungui), Estado do Paraná (Fig. 2), ocorrem ao longo de estreitas faixas SW-NE, pouco a norte de Curitiba, incluindo os municípios de Colombo, Almirante Tamandaré e Bocaiuva do Sul. Estes municípios fazem parte da região metropolitana de Curitiba e estão envolvidos em extensivo processo de ocupação urbana e suburbana. Em Colombo (distrito sede e bairro Fervida) e Almirante Tamandaré, os terrenos cársticos são bastante peculiares, pois estão localizados em áreas de interflúvio entre uma bacia endorreica (Iguaçu), de longa história evolutiva e preservada em paisagens reliquias, e uma bacia exorreica (Ribeira, Fig. 2B), em estágio de entalhamento extremamente ativo, capturando e destruindo paleosuperfícies desenvolvidas na bacia do Iguaçu. Um intenso aproveitamento dos recursos hídricos desta região vem sendo feito por órgãos públicos, empresas privadas e particulares, com registro de diversos eventos de instabilização do relevo e de redução da disponibilidade da água superficial. Detalhes sobre as características dos sistemas aquíferos cársticos na região podem ser obtidos em ROSA FILHO; GUARDA (2008).

Os diversos terrenos são caracterizados por cinco aspectos distintivos (Fig. 2):

- (1) A região situa-se na junção dos atuais arqueamentos (Ponta Grossa e da Serra do Mar). Desde o Mioceno (cerca de 10 Ma) está sujeita a uma das mais altas taxas de soerguimento no Brasil, só comparável à de áreas de montanhas

orogenéticas (SOARES; LANDIM 1975; FRANCO-MAGALHAES et al, 2010);

- (2) Efeito de mudanças climáticas. O sistema se desenvolveu sob clima variando entre tropical e temperado, semiárido e úmido, cuja história é ainda pouco caracterizada (SOARES et al, 2002; SOARES et al, 2011). O clima passou de quente e úmido (Mioceno, >6 Ma), para quente e semiárido (Plioceno, ~2 Ma); quente e seco (savana, Pleistoceno, ~1 Ma); frio e seco durante a última glaciação (20.000 a 10.000 anos) e subtropical úmido (nos últimos 6.000 anos) com floresta, e sem estação seca.
- (3) As rochas que sustentam os diversos sistemas são calcários dolomíticos e dolomitos (raramente calcíticos), falhados e dobrados, com direção ENE a NNE, intercalados com rochas siliciclásticas, com metamorfismo de baixo grau (Fig. 2) significando que não têm permo-porosidade primária e apresentam uma solubilidade baixa, ocorrendo infiltração apenas através de descontinuidades estruturais não seladas (FIORI, 1992; LISBOA; BONACIM, 1995);
- (4) A bacia hidrográfica apresenta uma taxa de denudação por erosão remontante excepcionalmente elevada, com elevado gradiente hidráulico, na bacia do Ribeira, com desníveis regionais de quase mil metros e locais de centenas de metros;
- (5) Ocorrem faixas de mais intensa presença de diques de diabásio com espessura variada, em média 15 m, mas chegando até 200 m, com orientação N70W a N45W, quase ortogonais à direção das faixas de calcários, que constituem barreiras ao fluxo no carste (ROSA FILHO et al, 2002);

Estas condições constituem particularidades que dão o caráter único ao carste do interflúvio Iguaçu-Ribeira. Também implicam no papel preponderante das descontinuidades estruturais na infiltração e dissolução dos carbonatos, na coexistência de formas cársticas encobertas ou preenchidas, formas exumadas ou denudadas, e formas em construção, em evidente desequilíbrio processo-resposta.

Em faixas ainda preservadas da erosão remontante atual, como é o caso do interflúvio na região de Colombo, estão presentes remanescentes de relevos mais antigos, ou paleosuperfícies, com suas formações superficiais e de subsuperfície

(NASCIMENTO et al, 2012). O relevo cárstico preexistente foi apenas parcialmente dissecado, permanecendo encoberto sob formações superficiais e parcialmente preenchidos por sedimentos. Esta cobertura apresenta depósitos de cascalho, areia e argila, paleossolos e alteritos residuais, com espessuras de até 40 m, na maioria dos casos preenchendo as cavidades prévias do relevo epicárstico. Nestas condições, e sob um clima úmido e temperado, vem evoluindo o processo de carstificação superposto a um carste polifásico parcialmente soterrado. Na bacia do Açungui-Ribeira, ocorrem diferentes faixas de transição entre um relevo cárstico polifásico (caso de Colombo) e um relevo cárstico inteiramente dissecado (caso de Bocaiuva).

Pelo menos quatro sítios com características diferentes podem ser identificados na região, com características similares de carste polifásico (LISBOA, BONACIM, 1995; ANDREOLLI et al, 1999): Colombo (sede), Fervida (bairro), Boichininga e Tranqueira. Os sítios de Colombo e Fervida situam-se nas maiores altitudes das cabeceiras do rio da Onça, afluente do Ribeira, no divisor de águas com o Alto Iguaçu. Os outros dois situam-se nas cabeceiras do Barigui, afluente do Iguaçu.

Colombo e Fervida são considerados juntos neste trabalho. Na cidade de Colombo, na área do interflúvio, o relevo cárstico encontra-se entre 950-1050 m de altitude; a jusante, no bairro Fervida, as altitudes são menores, entre 900 e 950 m. As formas de relevo de superfície e as formações de subsuperfície são bastante diversas nas paisagens dissecadas e preservadas, com a principal diferença decorrente do desequilíbrio das formas cársticas antigas com os processos atuais. A área de Colombo-Fervida constitui um caso de carste encoberto por formações superficiais de elevada permo-porosidade, que protegem o sistema cárstico e, eventualmente, são submetidas a eventos catastróficos de colapso.

Na paisagem preservada, boa parte das formas superficiais de relevo de carste úmido prévio está recoberta e preenchida por formações superficiais de clima mais seco e mais frio; nas paisagens dissecadas ocorre exposição das formas antigas pela remoção acelerada das formações superficiais não consolidadas, rebaixamento do nível de base, expondo cavernas e condutos, gerando abundantes fontes superficiais e aumentando a velocidade de fluxo subterrâneo.

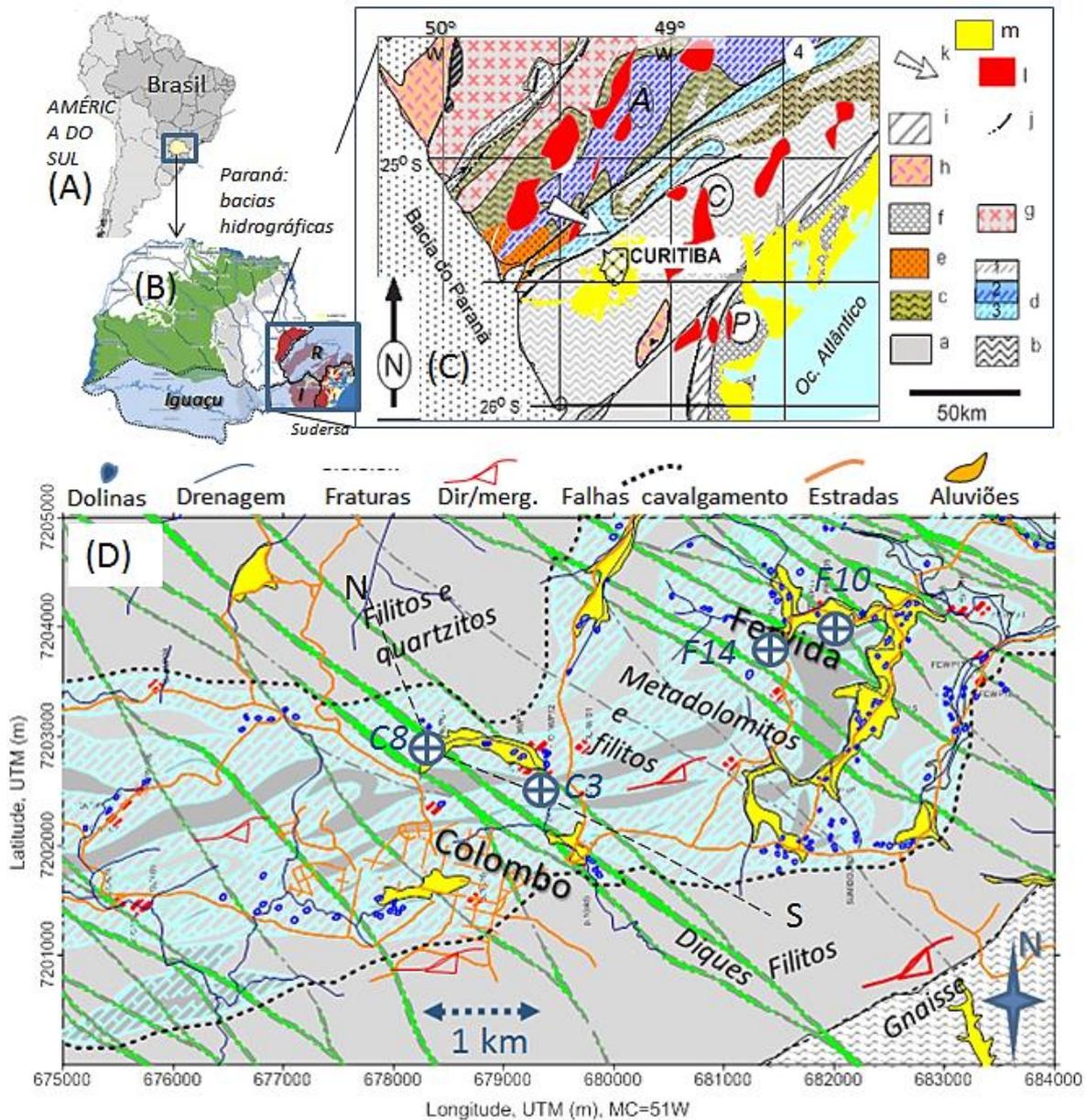


Figura 2 – Localização e contexto geológico regional e local do terreno cárstico de Colombo-Fervida. (A) Localização geográfica. (B) Localização do divisor de águas entre bacias dos rios Iguazu (I) e ribeira (R). (C) Contexto geológico regional dos terrenos cársticos no leste do Paraná: P – Bloco costeiro; C – Bloco Curitiba; A – Faixa Apiaí; I – Faixa Itaiacoca. Litologias: a – granitos, gnaisses e granulitos; b – gnaisses, granulitos e migmatitos; c – Xistos, quartzitos e mármore; d – terrenos cársticos em metadolomitos e filitos: 1 – Itaiacoca; 2 – Votuverava; 3 – Capiru; e metassedimentos terrígenos (Camarinha); f – granitos e gnaisses do complexo Paranaçu; g – Complexos batolíticos de granitos; h – Vulcânicas continentais (Castro, Guaratubinha); i – milonito-gnaisses; j – falhas; k – localização da área de investigação; l – granitos; m – rochas sedimentares cenozoicas (Guabirotuba) e aluviões recentes. (C) - Geologia local: metadolomitos e filitos em faixas descontínuas falhadas e dobradas, interrompidas por diques de diabásio. N-S: localização da seção da Fig. 3 e dos poços estudados (CO03; CO08, FE10 e FE14) (compilado de várias fontes: UFPR, SANEPAR, MINEROPAR; FIORI, 2005).

Pelo menos três faixas com ocorrência extensiva de rochas carbonáticas ocorrem na região. Foram submetidas a processos deformacionais policíclicos intensos com metamorfismo de grau fraco, além de intrusões de batólitos e plutões de granitos (Fig. 2B). O carste do sítio de Colombo foi desenvolvido dentro de uma faixa de metadolomitos com intercalações de filitos com 20 km de extensão por 2 km de largura, margeada por falhas de

cavalcamento (Fig. 2D), filitos e quartzitos, e interceptada obliquamente por diques de diabásio (FIORI, 1992; SOARES et al, 2005). O conjunto está dobrado em sinclinais e anticlinais fechados, inclinados, falhados e mergulhantes com ângulos em torno de 50° para SE. É esperado que os canais principais tenham se desenvolvido nas linhas de charneira e falhas longitudinais e que estejam interrompidos nos diques de diabásio (LISBOA;

BONACIM, 1995). Nestas barreiras, o escoamento é retardado o suficiente para manter o epicarste inteiramente saturado, com o nível freático a apenas alguns metros da superfície e inúmeras fontes de pequena vazão. Nestas condições, diversos *poljes* na forma de lagoas ou brejos e dolinas pouco desenvolvidas são mantidos, enquanto sumidouros, ou *sinkholes*, são quase ausentes. Entretanto, o rebaixamento do nível da água pelo bombeamento em poços provoca uma reabertura e ativação do epicarste, com aceleração do fluxo e desestabilização do sistema, reativando os eventos catastróficos.

As formações superficiais recobrem paleosuperfícies, rampas e terraços pré-atuais, constituindo um importante fator na recarga dos aquíferos, pois estabelecem um manto de maior permo-porosidade e um padrão de fluxo mais lento, tanto do fluxo superficial como subterrâneo (escoamento laminar nas rampas, infiltração nos terraços); o escoamento subterrâneo se faz neste manto inconsolidado que preenche o epicarste e apresenta propriedades de um aquífero, permitindo a filtragem das águas de superfície antes de entrarem na zona de circulação principal. Entretanto, a abertura de fendas ou estruturas de colapso desta cobertura sobre cavidades subsuperficiais altera inteiramente este regime de infiltração, provocando uma aceleração desenfreada do fluxo e a conseqüente entrada de águas superficiais não depuradas no aquífero. São referidos casos de entrada quase imediata de água da superfície durante testes de bombeamento (SANEPAR, 1998; HARUM et al, 2000).

3. DADOS, MEIOS E MÉTODOS

3.1. Dados

A área de estudo (cerca de 50 km²) possui mais de 70 poços para aproveitamento hídrico (SANEPAR, 1998; HARUM et al, 2000), muitos inativos por problemas operacionais ou ambientais. Quatro poços foram selecionados para investigação: CO-03, CO-08, FE-10 e FE-14 (Tabela 1 e Fig. 2). Os dois primeiros na cidade de Colombo, a uma altitude de 1050 m, e o terceiro e quarto na localidade de Fervida, cerca de três quilômetros a leste, a 940 m. Nestes poços, foi realizado pelas equipes da SANEPAR e SUDERHSA (convênio UFPR/Joaneum Institute, ROSA FILHO et al, 2002; HARUM et al, 2000) o monitoramento da vazão e do nível dinâmico por meio de leituras locais com frequência bastante regular (entre 3 e 9 dias), durante um período superior a um ano e meio, permitindo incluir na análise observações das quatro estações climáticas (dezembro de 1998 a maio de 2000).

Medidas do nível dinâmico (ND) em metros e da vazão (Q) em metros cúbicos/hora foram tomadas em intervalos diferentes para cada poço e para cada medida, variando entre duas realizações em um dia até uma em 15 dias, porém, predominando o intervalo de 3 dias (Fig. 3). As medidas foram convertidas em vazão específica (VE, m³/(h.m)). Dados de precipitação foram fornecidos pelo SIMEPAR, para a estação pluviométrica de Colombo (PR), constituídos por planilhas mensais com anotação diária do total da precipitação em milímetros por dia. Ambas as séries foram convertidas em dias corridos a partir de 01/12/1998 até 15/05/2000 (Fig. 3).

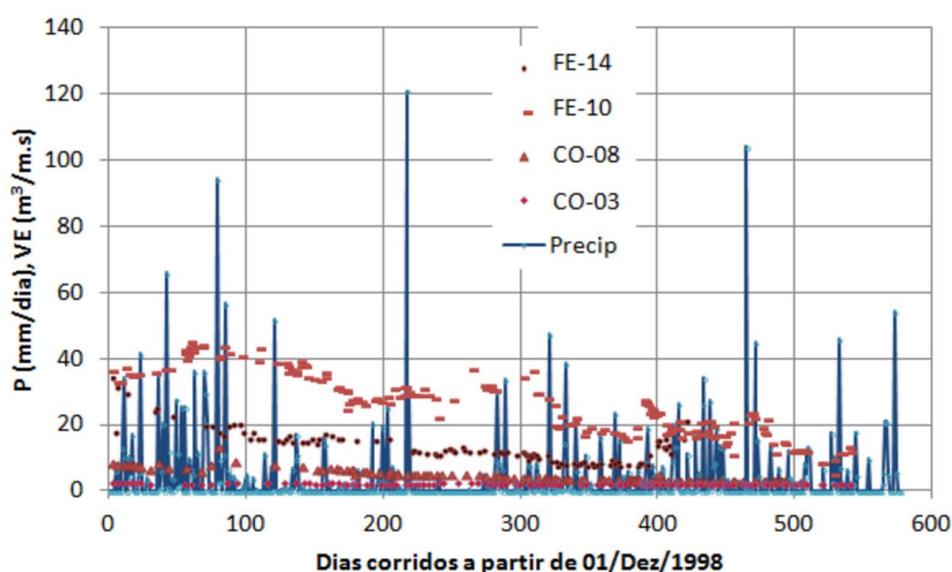


Figura 3 – Representação das séries temporais de precipitação (P) e vazão específica (VE) para os quatro poços selecionados, mostrando a variabilidade, a aparente ausência de correlação e a tendência para decaimento da vazão específica.

3.2. Poços investigados

Para facilitar a avaliação e interpretação hidrogeológica e geológica dos resultados, uma breve descrição geológica dos poços investigados é apresentada abaixo, destacando aqueles elementos com os quais se espera uma relação com o comportamento da vazão:

Poço CO-03 - Está situado a 988 m de altitude, em um paleovale preenchido, na borda do epicarste encoberto (30 m de formações superficiais). Em subsuperfície, corta metadolomitos, próximo à terminação de um sinforme, limitado por filitos e junto a um dique de diabásio a leste. Foi perfurado até 66 m em metadolomitos, com entrada de água em zona de fratura na base. A vazão durante o período de monitoramento foi mantida em 90 m³/h, variando o ND em torno de 42 m.

Poço CO-08 - Está situado em área de epicarste encoberto por formações superficiais (27 m de espessura), em um pequeno sinforme inclinado para sudeste, alcançando 68 m de profundidade. Entradas de água ocorrem por cavidades em torno de 50 m (2 m de altura); 52 m (6 m de altura) e 63 m (2 m de altura). Danos superficiais como o esgotamento de fontes e recalque foram relacionados ao bombeamento deste poço. Durante o período de monitoramento, a vazão foi mantida entre 43 e 112 m³/h, rebaixando continuamente o ND, e a VE mostrou tendência de redução progressiva (Fig. 5A). Dada a irregularidade nas médias até o centésimo dia, estes dados iniciais não foram usados, trabalhando-se com a janela de 100 a 500 dias de observações.

Poço FE-10 - Está localizado a 949 m de altitude, com 30 m de profundidade, em zona de epicarste encoberto (cerca de 9 m de sedimentos), numa zona de baixo terraço esculpido sobre rampa de colúvio. As entradas de água ocorrem em zonas de fratura nos metadolomitos, a 22 e 26 m de profundidade. A vazão foi mantida entre 29 e 150 m³/h, com média de 95, e o ND entre 2 e 6 m, com

média 4, sendo progressivamente rebaixado. A VE resultante mostra tendência decrescente nos 539 dias de monitoramento, considerados em 180 eventos de observação (Fig. 3). Diversos impactos superficiais, como esgotamento de fontes, recalque e reversão de fluxo foram relacionados ao bombeamento

Poço FE-14 - Situa-se na planície de epicarste encoberto, a 946 m de altitude (profundidade de 153 m, com 35 m de formações superficiais), a norte do sinforme de Fervida (inclinado para sudeste), limitado por filitos e junto a um dique de diabásio (a oeste). As entradas de água ocorrem em uma cavidade a 34 m, e, possivelmente, em zona de fratura a 123 m. Impactos superficiais, como esgotamento de fontes e recalque foram relacionados ao bombeamento. A vazão durante o período de monitoramento variou entre 0 e 134, com média de 62 m³/h, com ND em torno de 4,5 m e declínio contínuo

Estas principais características são resumidas e comparadas na Tabela 1.

Como as cinco séries não são homólogas, foram necessárias diversas formas de transformação, tomando-se o cuidado de preservar a representatividade dos dados originais e evitar a geração de artefatos de processamento.

Os valores de precipitação diária (P, mm/dia) são muito inconstantes (Fig. 4), tendo ultrapassado 100 mm em um dia, sucedido por valores nulos nos dias seguintes. Ajustam-se a uma distribuição log-normal, o que torna a série de tipo diferente daquela dos valores de vazão específica (VE) ou nível dinâmico (ND), com distribuição normal. Este fato torna a correlação direta entre as duas séries de difícil interpretação, mesmo buscando o pareamento de valores para intervalos regulares de dias anteriores, em virtude do fato da distribuição log-normal ter uma média dependente da variância. Para superar este problema buscou-se transformar a variável P. Por outro lado, como muitos dias não apresentam precipitação, a adoção do logaritmo implicaria em perda de informação.

Tabela 1 – Algumas características dos poços investigados (dados SANEPAR, 1998).

POÇO	Altitude (m)	Prof. (m)	Espessura Cobertura (m)	Entrada água (m)	Esp. (m) Conduto	Vazão (m ³ /h)	Nível Estático (m)	Nível Dinâmico (m)	Num. Dados
CO-08	1018	68	24	47	3	43-111	1,5	8 a 15	119
CO-03	988	66	30	59	<1	~90	-	42	147
FE-10	949	30	9	22 e 26		97	2,66	2,5 a 4	152
FE-14	939	88	31	48 e 135	<1	0-134	2,55	4,5	161

3.3. Transformação dos dados

Os procedimentos metodológicos utilizados para transformação e adequação das variáveis foram os seguintes:

1. Filtragem por meio de médias móveis;
2. Abandono de valores extremos;
3. Corte de seções das séries;
4. Transformação logarítmica e log-normalização com terceiro parâmetro m ;
5. Normalização: transformação para média zero e valores em unidades de desvio padrão (reduzida Z);
6. Adoção de valores incrementais para tolerância no passo;
7. Uso de tolerância temporária para valores acumulados de precipitação.

As medidas se referem sempre a unidades de tempo, como mm/d para a precipitação pluviométrica, ou m^3/h para vazão e $m^3/(h.m)$ para vazão específica. Desta forma, a utilização de valores acumulados ou médios não provoca interferência nos resultados e, ao mesmo tempo, tende a normalizar a distribuição e eliminar os valores nulos.

Dada a elevada variabilidade da precipitação, com média em torno de 4 mm/dia, porém, com valores acima de 50 e outro acima de 100 mm/d, a primeira transformação foi a adoção de uma média móvel da precipitação (P , variável independente). Observou-se que a distribuição tende para a normal para médias envolvendo três dias ou mais (Fig. 3). Na correlação, foram usados apenas os valores da meia-janela anterior aos dias de medição de ND, para a variável VE. Esta meia-janela variou entre 1 e 6 dias. Este procedimento corresponde a considerar o volume de precipitação diária média no período anterior ao evento testado como correlato na série VE.

Uma segunda transformação foi a adoção do logaritmo natural dos valores médios de P , trabalhando-se, então, com uma distribuição dos logaritmos, aproximadamente normal. A terceira transformação testada foi a adição de um valor calculado (terceiro parâmetro) à série, de forma que a ajustasse a uma distribuição log-normal. Os resultados não foram apropriados e o procedimento foi rejeitado. Para reduzir os valores às médias e variâncias comparáveis, as duas séries foram transformadas em variáveis reduzidas, ou seja, uma variação em torno de média zero e em unidades de desvio-padrão. As diversas séries de medidas de

nível dinâmico ou de vazão específica mostram tendências a diminuir gradativamente com o tempo, razões pelas quais foram testadas as comparações com as séries de valores residuais, retirando as tendências tanto de variação linear (grau 1) como parabólica (grau 2).

Para os quatro poços examinados foram testados os diferentes procedimentos, tendo dois cuidados metodológicos básicos: (1) apenas ressaltar os efeitos, sem gerar artefatos; e (2) que os procedimentos mais simples prevalecessem, no caso do mais complexo não resultar em melhorias significativas e esclarecedoras nos resultados. O efeito mais comum nos resultados analíticos foi a elevada instabilidade dos valores obtidos quando as séries comparadas não recebiam nenhuma preparação prévia. Ao mesmo tempo, as séries mostravam valores baixos de correlação, com pouca confiabilidade. Os procedimentos foram explorados exaustivamente, buscando melhorar os resultados de correlação e ressaltar os intervalos de baixa covariância.

3.4. Comparação e correlação entre séries

A concepção básica que envolve a análise das relações entre entrada e saída em sistemas é a de que há um retardo no pico de correlação entre as duas séries. Este retardo, no caso de sistemas aquíferos, entre precipitação e vazão específica (VE ou ND, em alguns casos com Q constante) corresponde ao tempo de trânsito mais frequente entre a precipitação e o acesso das águas ao poço no aquífero. Desta forma, pode-se calcular o grau de associação via coeficiente de correlação (r , de Pearson) entre as duas séries temporais, para uma defasagem zero, ou seja, sem retardo entre as séries. Num passo seguinte, adota-se uma defasagem (*lag*) entre as séries (uma diferença de tempo), calculando-se novamente a correlação entre esta nova posição, considerando os novos pares; depois para uma defasagem maior e, assim, sucessivamente. Compara-se, então, para qual defasagem ou deslocamento ocorre melhor correlação, plotando-se o coeficiente de correlação contra o tempo de defasagem, ou passo, e compondo a função correlograma. Alternativamente, foi usada a função semivariograma, onde o coeficiente de associação estimado é a média dos desvios quadráticos entre os pares, para cada passo.

Esta defasagem, dada pelo passo no qual ocorre melhor correlação, corresponde ao retardo para o qual um período de maior ou menor precipitação implica num valor maior ou menor, respectivamente, de vazão específica. Tendo em

vista que nas duas séries não houve observação contínua, nem em datas coincidentes, adotou-se uma tolerância para a defasagem, como é comumente utilizado para construção de variogramas e correlogramas em geoestatística. As experiências de correlação foram feitas tanto usando ferramentas convencionais (LANDIM, 2011), como a covariância, o variograma e o coeficiente de correlação de Pearson. Naturalmente, o correlograma tende a repetir valores, embora um pouco menores, para períodos múltiplos de eventos anteriores, o que exige atenção na sua avaliação.

Diversas rodadas foram executadas alterando parâmetros, especialmente eliminação de diferentes valores espúrios de intervalos iniciais ou finais muito diferentes, retirada de tendência, média móvel com várias dimensões de janela, tamanho do passo, tolerância. Na avaliação dos resultados destas rodadas foram considerados alguns critérios, como: (a) variabilidade x consistência dos picos de correlação; (b) repetição de valores elevados no mesmo pico de correlação; (c) ausência de efeito deriva (tendência para aumentar ou diminuir sistematicamente os valores no correlograma); e (d) persistência dos picos em diferentes procedimentos.

3.5. Confiabilidade dos resultados

Os resultados de coeficientes de correlação obtidos para cada ponto são bastante variados e podem ser considerados suspeitos de serem apenas amostrais (circunstanciais), obtidos dentro de um conjunto possível de valores, cuja média seria zero, ou seja, não teriam um significado consistente de correlação entre os eventos, na medida em que se tem elevada variabilidade dos sucessivos valores. Valores de correlação podem ser fortemente influenciados por oscilações artificiais coincidentes, mas como isto não ocorreria sistematicamente com um mesmo intervalo de recorrência pouco influiria no valor final, no caso de serem muitos os pares comparados.

Para avaliar a validade dos resultados, ou contrariamente a possibilidade dos picos serem resultados circunstanciais, foram realizados testes de significância, utilizando a estatística *t* de Student. A hipótese H_1 é a de que os resultados são significativos, para o conjunto de pares no intervalo considerado. A hipótese alternativa testada, H_0 , é a de que o valor obtido é um dos possíveis valores de uma população cuja média é zero e, portanto, não tem significado de correlação, tanto positiva como negativa. Tendo-se os valores de *t* calculados maiores que *t* previstos, a um nível de confiança de 0,95, rejeitou-se a hipótese H_0 e se aceitou a hipótese

H_1 , de que os valores de correlação obtidos são significativos.

O aumento do tamanho da amostra, ou seja, número de pares em cada passo na comparação entre as séries, como estratégia para reduzir a possibilidade de ser cometido um erro de avaliação, foi feito com a adoção de maior tolerância no passo, embora neste caso deva se admitir que se introduz a possibilidade de juntar no mesmo passo eventos conexos e eventos excludentes.

Aplicativos - Para facilitar a repetição na análise dos dados, foi desenvolvido um aplicativo simples, com o compilador TurboBasic^{MR} (Borland 1987), de forma a se ajustar o tipo de dados e calcular tanto a função correlação cruzada como a função variograma entre duas séries X e Y não coincidentes de dados temporais, adotando-se relações convencionais para as funções:

$$\text{Correlação } XY = r = \text{covariância } XY / \text{raiz}[\text{variância } X_{(t)} \times \text{variância } Y_{(t+\Delta t)}]$$

$$\text{Variograma} = \gamma = (1/2N) \times \text{Somatório } [X_{(t)} - Y_{(t+\Delta t)}]^2$$

$$\text{Covariância} = \text{variância} - \text{variograma}$$

A relação entre covariância e variograma se refere a séries normalizadas, com média zero e desvio padrão unitário.

O valor de Δt foi tomado desde zero até um terço da série e corresponde à defasagem ou passo (*lag*), para o qual são plotados os valores do coeficiente de correlação cruzada e do covariograma, os quais são referidos no texto apenas como correlação (*r*) e variograma (γ). Os valores $r=f(\Delta t)$ e $\gamma=f(\Delta t)$ são computados, considerando uma tolerância ou intervalo de aceitação em torno de Δt .

O programa trabalha a partir da leitura dos dados de duas séries temporais, com os dados observados, em um único ou em dois arquivos distintos. Tem a opção de normalizar (Z) e log-normalizar as variáveis dependentes, estimar as médias móveis, retirar tendências e trabalhar com resíduos, excluir intervalos espúrios, filtrar valores, com janela móvel descentrada e tolerância variável no passo. Calcula as funções variograma bruto e normalizado e a correlação, com o número de pares em cada passo e a distância média no passo. Salva nos formatos .txt ou .bln. Os diversos tipos de procedimentos foram testados. A adoção do resíduo de tendência e da média móvel foi uma forma de reduzir o efeito da excessiva flutuação dos valores de uma variável (como a precipitação) e aproximar sua distribuição a uma curva normal. A coluna de tempo é independente nos dois arquivos, porém, a contagem corrida para os dias de eventos medidos é a partir da mesma data, tomada com 01/12/1998.

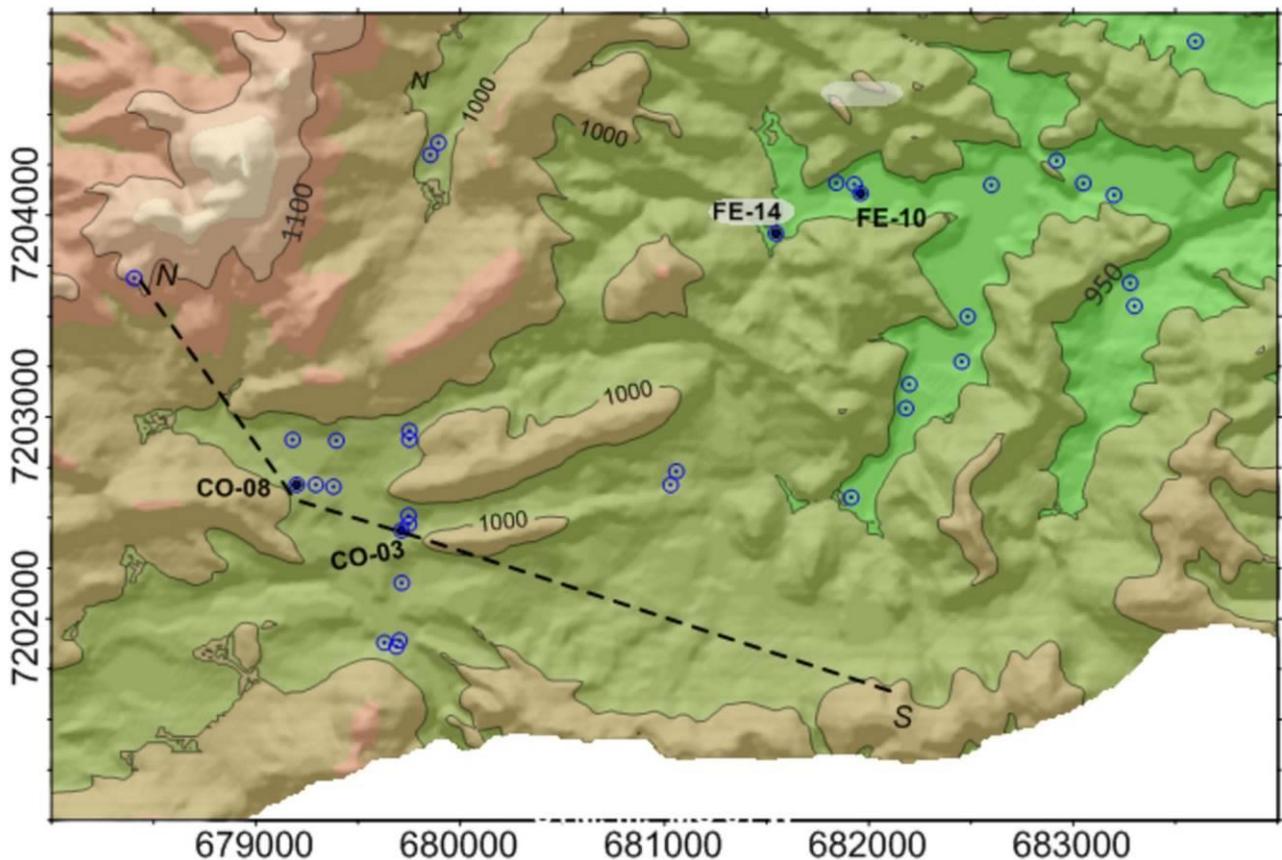
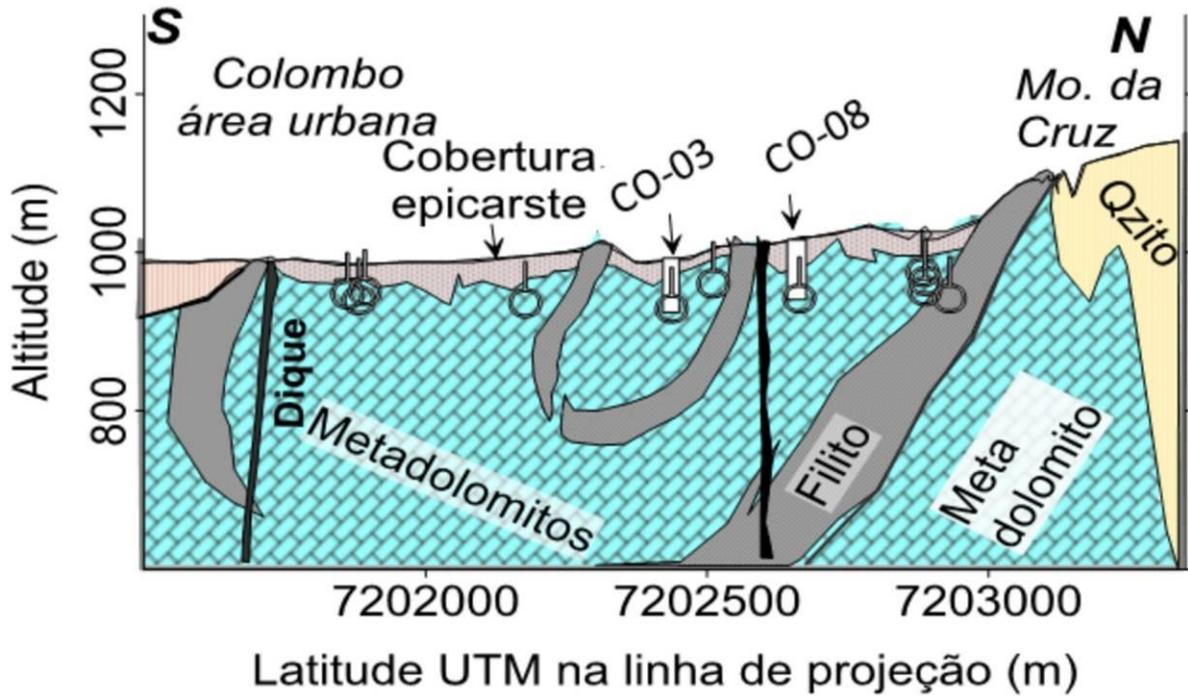


Figura 4 - (A) Seção geológica norte-sul (localização NS no mapa abaixo) cortando o carste de Colombo, com localização dos poços CO03 e 08, entre outros. Nota-se a organização estrutural, a presença de diques (traço preto espesso) e a forma geral do pediplano, a partir do Morro da Cruz, na paleosuperfície em que se desenvolveram o carste e a cobertura de epicarste em pedimentos menores. (B) Compartimentação do relevo dada pelas cristas em filito (NE-SW) e em diques de diabásio (NW-SE). Estão locados os diversos poços da área (em azul vazado), com designação e destaque para os investigados (CO-03, CO-08, FE-10 e FE-14).

4. RESULTADOS OBTIDOS, ANÁLISE E AVALIAÇÃO

Poço CO-03

A vazão específica (VE) mostra progressiva depressão no período (Fig. 5A). Das diversas variações de parâmetros para estimação da correlação cruzada mais robusta, algumas são mostradas nos quatro quadros da Fig. 5. O correlograma com dados originais mostra grande variabilidade, com alguns conjuntos de picos de correlação positiva (21, 78, 90 dias de retardo) e o efeito deriva dado pelo progressivo aumento da correlação. Adotando-se alguns procedimentos como a eliminação de valores extremos de P e da tendência de VE, e aceitando uma tolerância na composição dos pares, o correlograma torna-se mais robusto (Fig. 5C); a covariância, estimada pelo covariograma com diferença entre variância (unitária) das variáveis normalizadas, equivalente à correlação (1-Gz), mostra uma correção do efeito “deriva” melhorando o resultado em relação ao cálculo convencional da correlação (Cor). Adotando ainda a média móvel de dois dias em P, sem correção do efeito “deriva” (Fig. 5D), ressalta-se a maior correlação em 78 dias. Corrigindo esse efeito, com média móvel de 3 dias anteriores de P e tolerância também de 3 dias (Fig. 5E), os picos aparecem mais consistentes (22, 56, 80 dias).

Os dados brutos mostram alta instabilidade, com destaque para picos de correlação em 23 e 80 dias de retardo, com valores inferiores a 0,15. Retirando a tendência da VE, não ocorre melhora na estimativa do correlograma. Usando a função variograma das variáveis normalizadas para estimar a correlação, corrige-se o efeito deriva, alterando a hierarquia de picos. Aplicando média móvel de 2 dias na P (MM=2) e com tolerância de 1 e 2 dias no retardo, os resultados ficam notavelmente mais estáveis e significativos, com picos aos 45, 56 e 79 dias de retardo (Fig. 5B e 5H). Retirando as tendências, mantêm-se os picos, com um melhor coeficiente de correlação após 45 dias de retardo (Fig. 5D e 5F), constatou-se que: (1) a série de dados de ND, base de determinação da VE, é muito interrompida por falta de leitura; e (2) a série de dados de P é naturalmente muito flutuante, com valores excepcionais (> 100 mm/dia) e muitos valores zero. A média móvel com janela de 6 dias, embora lidos apenas os 3 dias anteriores, suavizou os resultados. Os valores de correlação nos picos são baixos (entre 0,1 e 0,2), embora significativos, pois o número de pares é superior a 300, para tolerância 2 ou maior.

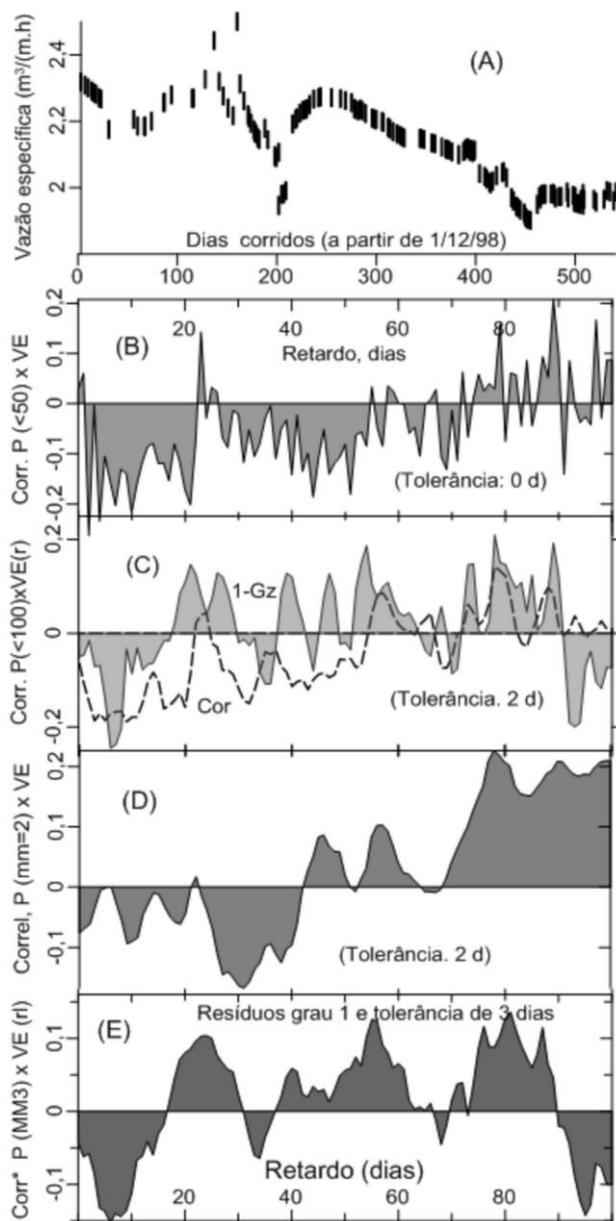


Figura 5 - Poço CO-03, resultados do processamento: (A) dados originais de VE [(m³/h)/m] aos quais foi ajustada a função linear para retirada da tendência, ou efeito deriva;

(B) correlograma com valores originais de VE e tolerância zero; (C) correlograma entre P (excluídos os valores maiores que 100 mm) e valores residuais de VE (m³/(h/m)), com tolerância de dois dias: 1-Gz se refere à correlação obtida com o complemento do variograma normalizado e Cor ao coeficiente de correlação; (D) correlograma usando a média móvel de P para dois dias e a VE, com tolerância de dois dias; (E) correlograma calculado pela função variograma normalizado, com média móvel de três dias prévios de P e resíduos de grau 1 dos valores de VE, com tolerância de 3 dias. Observar um pico frágil de correlação entre 20 e 25 dias, mais significativo quando se retira a tendência (C e E), ficando mais confiáveis e robustos a 23, 55 e máximo em 80 dias.

Nos primeiros dias após as chuvas, o ND (para vazão constante) do poço CO-03 não muda seu comportamento descendente: a correlação é negativa, pelo menos até 10 dias de retardo, quando ocorre reversão. O primeiro pulso de recarga significativa no aquífero, a partir das águas de chuvas, ocorre com pico em 22 dias de retardo, depois em 56 dias e, mais significativo, a partir de 75 dias. Pode-se considerar que não ocorre infiltração direta no epicarste e que existem pelo menos três caminhos diferentes percorridos pelas águas da superfície até o poço, provavelmente por fraturas.

Poço CO-08

Os quatro correlogramas apresentados (Fig. 6) mostram os resultados da adoção de diferentes parâmetros em busca de maior robustez no correlograma. O correlograma dos valores de P, menores que 100 mm/d, com os resíduos de primeira ordem de VE (Fig. 6B), mostra elevada variabilidade e picos frágeis de correlação em 1 a 10 dias, 20 a 30 e 70-80 dias. Adotando-se média móvel em P (chuvas de 2 dias passados) e tolerância de 1 dia, aparece o efeito deriva (Fig. 6C), mantém-se o pico inicial e a correlação significativa em torno de 30 e 80 dias de retardo. Utilizando os valores residuais de VE com função linear, corrige-se o efeito deriva. A correlação torna-se estável desde os primeiros dias e crescente até o 35º dia de retardo. Com média móvel de P de dois ou três dias, o pico inicial desaparece. Com resíduos da função quadrática de VE, os valores continuam consistentes com elevada correlação, crescente desde o passo inicial, com máximo em 32 dias. Com tolerância zero, ao invés de 3, a correlação melhora. O desvio da média zero parece realmente indicar um dependência positiva contínua das chuvas, com máximo após 35 dias. Os intervalos persistentes de correlação situam-se no retardo inicial de 1 e 10 dias, entre 20 e 30 e entre 60 e 80 dias.

O poço CO-08 recebe afluxos de água no segundo dia após a precipitação, depois em 10 dias, seguindo-se os retardos entre 20-32 e 75-80 dias. Os dois primeiros afluxos têm curto intervalo de duração, desaparecendo quando se adota tolerância de 3 dias, e devem corresponder ao acesso da água às duas primeiras cavidades cortadas pelo poço. As recorrências de correlação positiva a 30 e a 70 dias, com duração prolongada por mais de 10 e 20 dias, respectivamente, indicam o aporte de água por fluxo relativamente lento.

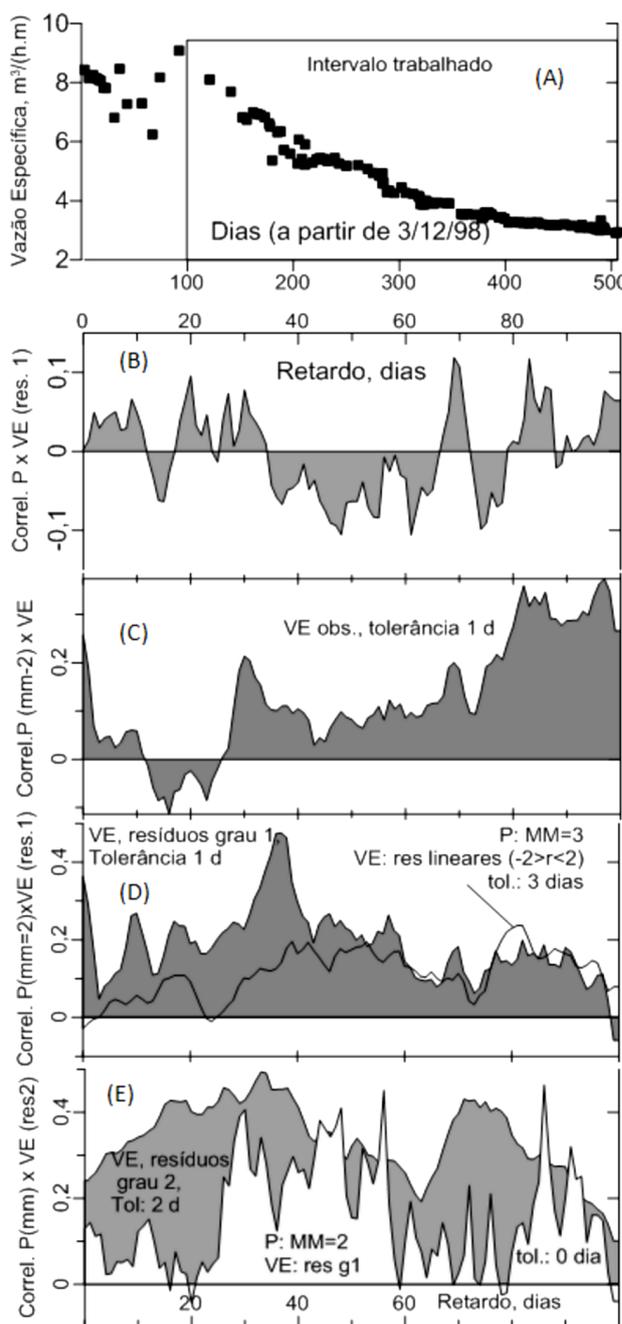


Figura 6 – Poço CO-08, resultados de diferentes procedimentos, com melhoria da correlação: (A) dados originais de VE [(m³/h)/m]; e intervalo trabalhado (B) correlograma cruzado entre P (mm/dia) e valores residuais de grau 1 de VE (sem tolerância); (C) correlograma, usando média móvel de dois dias de P com valores de VE, com tolerância de 1 dia, mostrando o forte efeito deriva; (D) correlograma com valores médios de precipitação para dois e três dias anteriores, e tolerância de 1 e três dias, notando-se o efeito da retirada da tendência de VE; (E) correlograma com valores médios de precipitação para dois e três dias anteriores, e tolerância de 1 e 0 dia, notando-se o efeito da retirada da tendência de ordem 1 e 2 de VE e da tolerância de 0 para 3 dias. Observar a melhoria nos valores de correlação, porem com perda de discriminação dos picos de correlação na aplicação da tendência quadrática em VE (res 2), com tolerância de dois dias.

Poço FE-10

Da série de vazão deste poço foram retirados os dados iniciais e finais (Fig. 7A) por apresentarem problemas operacionais de aquisição. O correlograma com os valores brutos (P x VE), sem tolerância, apresenta elevada variabilidade (Fig. 7B) e média positiva.

Adotando-se para os valores de P a média móvel dos 3 dias anteriores e tolerância de 1 dia, os resultados melhoram, porém ainda com muita variabilidade: evidencia-se uma correlação significativa de curto prazo, fraca, crescente, nos primeiros 4 dias de retardo; outros picos ocorrem em torno de 40 e com retardos maiores que 70 dias, porem bastante instáveis. A retirada da tendência (Fig. 7D) não melhora os resultados, permanecendo a instabilidade. Adotando os valores residuais da tendência linear na vazão (VE) e a média móvel com 2 dias anteriores na precipitação (P), com tolerância de 2 dias, o correlograma (Fig. 6E) fica robusto, com picos estáveis de correlação superior a 0,2: crescente até 15 dias, depois em torno de 40 dias e de 70 a 80 dias.

A correlação de curto prazo deve ser associada à percolação vertical no epicarste, no entorno do poço, enquanto as de médio e longo prazo (42 e 80 dias) podem ser associadas ao afluxo lateral em duas diferentes zonas de fratura.

Poço FE-14

Os intervalos inicial e final da série VE apresentam dados espúrios relacionados a questões operacionais e foram descartados (Fig. 8A), utilizando-se a série entre 60 e 390 dias.

No correlograma com precipitação P (retirados valores > 100 mm/dia), tolerância nula (Fig. 8B) não se verifica estabilidade na correlação entre as variáveis (valores positivos junto a negativos, inferiores a 0,13, mínimo para 150 pares); adotando a tolerância de 1 dia (Fig. 8C) ocorre melhora na estabilidade, com valores ainda baixos de correlação, excessivamente positivos, ressaltando o efeito deriva.

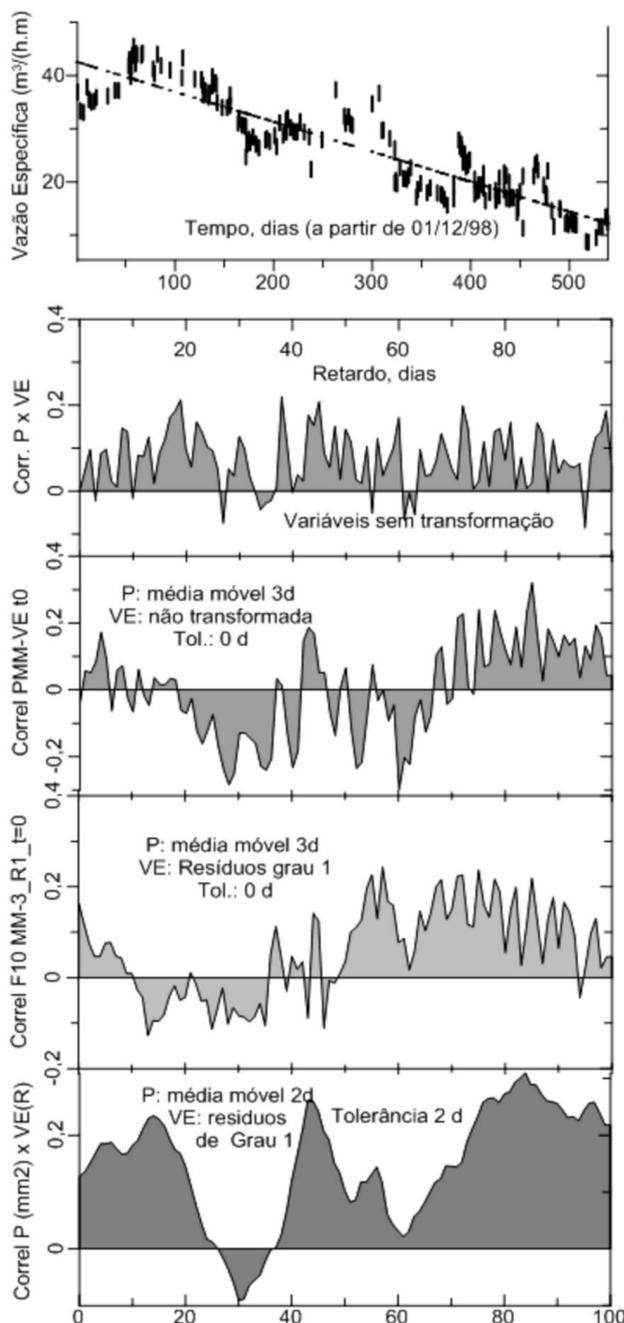


Figura 7 – Poço FE-10, resultados de diferentes procedimentos, com melhoria da correlação: (A) dados originais de VE [(m³/h)/m] e tendência linear negativa; (B) correlograma cruzado entre P (mm/dia) e valores naturais de VE (sem tolerância), com elevada variabilidade; (C) correlograma, usando média móvel de 3 dias de P com valores naturais de VE, sem tolerância, mostrando o efeito deriva; (D) valores médios de precipitação para 3 dias anteriores, com valores residuais de VE, tolerância de 2 dias, observando o efeito da retirada da tendência de VE, com variação linear e quadrática.(E) valores médios de precipitação, para dois dias anteriores, com valores residuais de VE e tolerância de 1 dia, observando o efeito da retirada da tendência de VE, e suavização com a tolerância. Observar a melhoria na estabilidade dos valores de correlação.

Usando $P < 50\text{mm}$, valores médios de P de dois dias (o homólogo e o anterior) e tolerância de 1 dia, obtêm-se os melhores resultados de correlação (Fig. 8D). Os picos são confiáveis e são similares para MP de 3 dias e T de dois dias. A correlação com valores incrementais ou variação de VE mostra boa definição dos picos de correlação, especialmente para retardos pequenos, contrariamente à correlação com os valores naturais. De forma similar à correlação com os resíduos de tendência de 1º grau, há ausência de deriva e média em torno de zero, porém com valores muito baixos ($< 0,1$), com tolerância de 1 ou 2 dias. Os campos em que os valores de correlação podem ser rejeitados ($n.c.=0,95$) estão mascarados com hachuras, para tolerância de um (>300 pares) e dois (>400 pares) dias.

Os picos ocorrem em torno de 11-12, 25-28, 60 e 80 dias de retardo, A 67 e 79-90 dias de retardo os picos são mais consistentes. Com a média móvel de 5 dias anteriores na série P e usando tolerância de 2 dias (Fig. 8E) preservam-se os picos de correlação mais consistentes: 25, 65 e 80

Observa-se que o aumento da tolerância e/ou da janela da média móvel reduz o valor obtido para o coeficiente de correlação, porém, tende a dar mais consistência, provocando a repetição agrupada de pontos de alta correlação. Da mesma forma, o uso de valores incrementais e de valores residuais de VE reduz o valor numérico do coeficiente, entretanto, delimita melhor o que são valores anômalos, uma vez que transfere a correlação média para uma base zero.

Tais resultados indicam que o aquífero não recebe recarga nos primeiros dias após as chuvas; porém entre 9 e 11 dias recebe fraco pulso de recarga, que desaparece para janelas de pluviosidade de 5 dias, indicando uma sensibilidade elevada para chuvas de um ou dois dias. Revela-se o aporte em torno de 25 dias, como um pico persistente, porém destaca-se o aporte entre 60 e 80 dias de retardo.

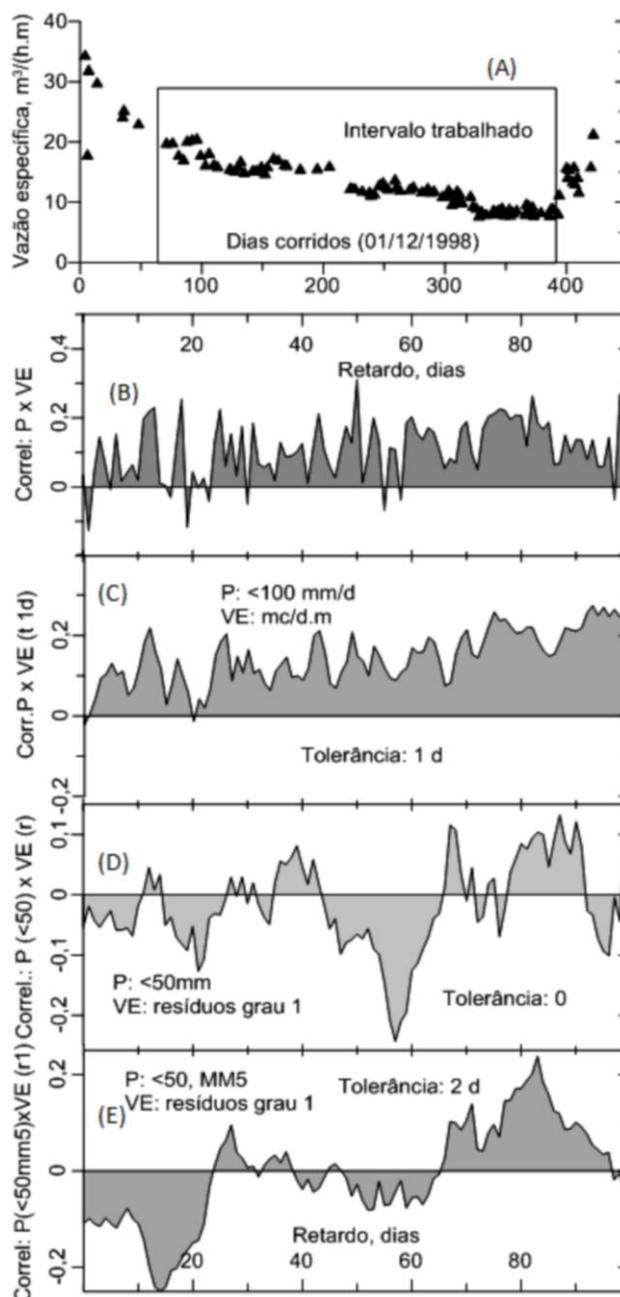


Figura 8 – Poço FE-14, resultados de diferentes procedimentos, com melhoria da correlação: (A) dados originais de VE [$\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$], intervalo trabalhado e tendência negativa; (B) correlograma cruzado entre P (mm/dia) e valores naturais de VE (sem tolerância), com elevada variabilidade; (C) correlograma, usando média móvel de 3 dias de P com valores naturais de VE , com tolerância de 1 dia, mostrando frágil poder de discriminação; (D) valores de precipitação, com valores residuais lineares de VE , sem tolerância, observando o efeito da retirada da tendência de VE . (E) valores médios de precipitação, para 3 dias anteriores, com valores residuais lineares de VE e tolerância de 2 dias, observando o efeito de suavização e maior robustez na correlação.

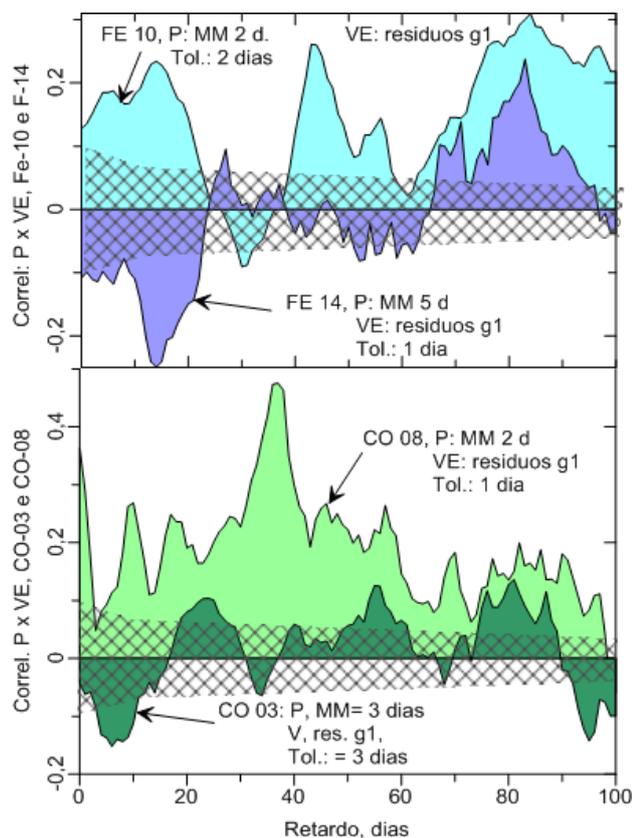


Figura 9 – Comparação entre os correlogramas com resultados mais consistentes de intervalo de retardo no aporte de água das chuvas para os quatro poços analisados, usando os valores da série pluviométrica menores que 50 mm/dia, média de chuvas de dois dias, o homólogo e o anterior, e tolerância de dois ou três dias: (A) Poço CO-03: sem correlação no curto prazo (até 20 dias) e correlação significativa no longo prazo (>70 dias), com pequena correlação no retardo médio (40-60 dias); (B) Poço CO-08: Diversos intervalos com boa correlação da variável VE representada pelos resíduos, destacando-se o de médio prazo (25 a 60 dias) e no longo prazo (80-90 dias), com correlação baixa mas significativa nos primeiros dias (1 a 3 e 10 a 12 dias de retardo); (C) Poço FE-10: forte correlação já no retardo inicial (primeiros 15 dias), no médio (40 a 50) e no longo prazo (70 a 100 dias); (D) Poço FE-14: Correlação com a variável VE representada pelos resíduos (cinza claro e branco) e pelos incrementos (cinza escuro), indicando picos consistentes de correlação no curto prazo, 10 a 12 e 25 dias, e no longo prazo (maior que 75 dias). Hachuras indicam zona de correlação não confiável no nível de 95% de probabilidade.

5. DISCUSSÃO

Na primeira avaliação dos procedimentos, foi feito um teste de significância dos resultados (*t Student*). Para todos os casos analisados, adotando tolerância zero, os valores obtidos se referem a número de pares entre 80-100 (FE-14, CO-08) e 120-150 (FE-10, CO-03), enquanto que adotando tolerância de 1 dia, o número de pares passa de 300; e com tolerância de 2 dias, o número de pares foi

superior a 400. Os resultados finais apresentados tratam de valores com número de pares superior a 200 e superior a 400, para os quais os valores de correlação acima de 0,1 e de 0,078, respectivamente, são confiáveis. Para o primeiro passo, o número de casos é próximo da metade, o que implica que, para ser significativo, o coeficiente de correlação neste passo deve alcançar 0,14 e 0,1, respectivamente.

Os resultados obtidos e que serviram de base para as conclusões mostraram uma probabilidade inferior a 5% de que a hipótese nula (de que os resultados não sejam significativos) seja verdadeira. Apesar desta coerência e da significância do ponto de vista estatístico, deve ser ressaltado que em muitas simulações não existiu uma relação não ambígua entre as séries temporais correlacionadas. Picos positivos e negativos de correlação não se mantêm em diferentes correlogramas, obtidos com diferentes transformações ou diferentes parâmetros. Os procedimentos adotados, especialmente na tolerância, permitiram lidar com estas dificuldades e alcançar resultados consistentes e significativos, com prejuízo da precisão da determinação do valor do retardo.

A tendência ao decréscimo de VE, bem como as variações sazonais na pluviosidade imprimem uma tendência no correlograma, com correlação predominantemente positiva e progressivamente maior, pois a variância nos passos maiores será maior, relativamente à variância média. O uso de resíduos e variações incrementais na VE reduz parcialmente este efeito, porém reduz bastante o valor numérico do coeficiente, porém, melhora os resultados para os passos menores do correlograma. O aumento da média móvel, especialmente na série pluviométrica, considerando apenas a metade anterior da janela, mostra bom resultados, eliminando a flutuação eventual.

Comparando-se os resultados mais consistentes para os quatro poços, e tendo em vista variações de curto e médio prazo (Fig. 8), verifica-se que a produtividade dos poços é dependente da precipitação no intervalo de 100 dias anteriores. É notável a divisão do retardo em três domínios temporais: curto prazo, 0 a 20 dias; médio, 20 a 60 dias e longo, acima de 60 dias. O poço CO-03 é o menos dependente no curto e médio prazo, indicando que a água não tem acesso direto por dutos à zona produtora. O CO-08 responde imediatamente aos eventos de chuva, indicando entradas diretas e imediatas ao aquífero aberto no epicarste e sucessiva dependência no médio e no longo prazo. Também os dois poços de Fervida mostram reação imediata da produtividade com a chuva, mas nestes dois casos, ocorre um contínuo e

progressivo afluxo de água, posteriormente ao período de chuvas de até 15 dias de retardo, no FE-14, recorrente no médio e no longo prazo. No FE-10, ocorre um pico de aporte de água cerca de 10 dias após a chuva e no longo prazo a cerca de 75-90 dias de retardo. Os poços CO-08, FE-10 e FE-14 são alimentados por cavidades, que devem estar conectadas com a superfície, explicando a relação imediata com as chuvas (Tabela 2) e o esgotamento de fontes e recalques associado ao bombeamento.

Nos eventos de médio prazo, destaca-se a pouca importância deste retardo de 20 a 60 dias nos poços CO-03 e FE-14 e sua forte presença nos poços CO-08 e FE-10. Os quatro poços mantêm relação com precipitação no longo prazo, para o período analisado, significando um aproveitamento do afluxo de outras fontes hídricas do carste. A presença do início de intervalo de correlação positiva, entre 25 e 45 dias, no médio prazo, indica ser este o retardo mínimo de trânsito da água no epicarste. Eventos com maior retardo devem estar relacionados à entrada d'água apenas em zona de fratura. Os poços de Fervida mostram seu comportamento diferenciado: o FE-10 com imediata entrada d'água após as chuvas perde esta relação em 15-20 dias, passando a receber afluxo por outra fonte a cerca de 40-50 dias. Tanto o FE-10 como o FE-14 mantêm a relação com a precipitação mais forte entre 75 e 85 dias, possivelmente abastecido pelo carste profundo.

Para os poços trabalhados e, considerando a espessura do epicarste encoberto como 30 metros, com um tempo de trânsito variável entre 10 e 35 dias, pode se estimar um valor de velocidade vertical

entre 1 e 3 m/dia. Neste caso, não se consideram os picos de curtíssimo prazo (1 a 5 dias), pois são interpretados como fluxo por condutos, com velocidade superior a 10 m/dia. Considerando os picos de correlação persistentes no longo prazo, em 70 dias ou mais, e associando-os ao fluxo em meio fraturado e a entradas abaixo do epicarste, ou seja, profundidades em torno de 60 metros (30 metros abaixo do epicarste), e 60 dias de trânsito, resulta em uma velocidade de 0,5 a 1 m/dia, o que pode ser considerado um valor elevado para meio fraturado, porém, compatível com o endocarste.

Ocorrência de maior correlação com a média móvel prévia mostra uma relação da recarga do aquífero com o avanço da frente de saturação do solo. Um pequeno ou médio episódio de precipitação provoca um avanço da zona úmida com a saturação do meio poroso que, para eventos individuais, não alcançaria a saturação de toda a coluna porosa. Entretanto, sucessivos eventos de precipitação provocam a saturação, decorrente de um determinado volume acumulado de água; com a saturação, ocorre o fluxo determinado pela energia gravitacional e pela permeabilidade do meio poroso, alimentando as zonas de depleção formadas pelo bombeamento. Uma espessura de solo não saturado de 2 m, com uma porosidade de 10% exigirá uma coluna líquida de água de 20 mm, o que significa alguns dias de chuva, para que passe a ocorrer recarga dos condutos, vazios ou zonas de fratura do carste. Desta forma, mesmo um evento isolado de chuva intensa, pode não apresentar relação com recarga do aquífero, o que fica evidenciado pela melhora da correlação com médias móveis.

Tabela 2 – Situação dos poços e resultados obtidos. (*) Média, +/- 2 desvios-padrões.

Poço profund.	Espessura da formação superficial	Profundidade da entrada de água registrada na perfuração	Vazão m ³ /h (*) e N.D. (m)	Retardo no afluxo, dias			
				Curtíssimo Até 5 dias	Curto 5 a 20 dias	Médio 20 a 55 dias	Longo >50 dias
CO-08 69 m	27 m	47-49 m, 52-58 m, 63-65 m, cavidades	66+/-40 11+/-4	2	9	28- 55	85 96
CO-03 66 m	30 m	66 m zona de fraturas	90+/-30 42+/-10	Ausente	Ausente	Incipiente	75
FE-10 64 m	10 m	26-27 m, cavidade	95+/-60 4+/-1,5	1-5	10-20	40-55	75-
FE-14 150 m	30 m	34-40 m, cavidades	62+/-34 4,5+/-2		5-10	25?	67? 75-80

De forma semelhante, a retirada de valores excepcionais de eventos de precipitação e a consequente melhora nos valores de correlação, revela um fenômeno conhecido, que é o fato da condutividade hidráulica ser limitada, exigindo tempo para a infiltração. Um excepcional volume de chuva num evento gera, então, um excedente hídrico na superfície que passa a escoar na superfície até alcançar as linhas de drenagem e seu fluxo para fora do sistema. Desta forma, um evento excepcional não teria correlação com a recarga excepcional, entretanto, reduziria em muito o coeficiente de correlação por implicar no aumento da variância que constitui um divisor no cálculo deste coeficiente.

A correlação de longo prazo se verifica em torno de 80 dias, mostrando que existem outros mecanismos de abastecimento, além da circulação no epicarste, correspondendo a afluxos muito lentos, com velocidades entre 10^{-1} a 10^{-2} m/d. É mais provável tratar-se de fluxo difuso (Atkinson 1977), em zonas de micro-fraturamento.

6. CONCLUSÕES

A análise por correlograma e variograma constitui um método apropriado para avaliação do tempo de trânsito da água da superfície até a profundidade de entrada de água no poço em aquífero não confinado e das condições de afluxo de água, bastando ter disponíveis séries temporais de medidas de precipitação, produção e nível dinâmico, superior a um ano.

Alguns procedimentos e cuidados metodológicos são necessários, especialmente em virtude do caráter não homólogo das séries e assíncrono das tomadas de medidas: (1) restrição a valores excepcionais, (2) retirada de tendência, (3) utilização de correlação com valores incrementais de passo, (4) uso de média móvel da pluviosidade nos dias anteriores, (5) a regularização com tolerância.

Com relação ao tempo de trânsito da água, verifica-se que ocorre uma diversidade de situações

geológicas que influenciam este tempo e, conseqüentemente, a produtividade e estabilidade da produção:

- Ω Os poços FE-10 e CO-08 têm as relações mais imediatas com as águas das chuvas, enquanto o CO-03 tem a relação distintamente mais remota.
- Ω No caso dos poços de Fervida, também a relação é imediata, no FE-14, já com um pico em 11 dias e outro em 25 dias, enquanto no FE-10 é progressiva já a partir do 1º dia até o 15º dia após as chuvas, indicando acesso da água por dutos e cavernas.

Os poços de Fervida têm uma dependência mais imediata das águas de superfície, enquanto os poços em Colombo mostram uma relação mais remota. A velocidade de trânsito em ambos os casos, mais comum no epicarste, situa-se na faixa de 1 a 3 m/dia.

Os quatro poços mostram um retardo comum entre 80 e 100 dias, o que indica uma propriedade do sistema cárstico da região, respondendo à elevação generalizada do nível d'água, com retardo quase sazonal.

Esta diversidade de situações é resultado dos diferentes componentes do sistema aquífero presentes na área e pelas relações entre estes componentes com o aquífero e com seu abastecimento a partir de águas da superfície, do epicarste, ou águas já hospedadas nas microfraturas das rochas, no endocarste.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à SANEPAR, pela disponibilização dos dados e aos colegas João Nogueira Filho, Alberto Fiori, Marcos Guarda e Elaine A. Bonacim, por acompanhamento no campo e discussões. Ao revisor anônimo da Espeleotema pela atenta revisão e contribuição para a qualidade do trabalho e clareza do texto.

REFERÊNCIAS

- AGGARWAL, P.K.; FROELICH, K.; KULKARNI, K.M. **GROUNDWATER – Vol. II – Environmental Isotopes in Groundwater Studies**. ©Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Disponível em: <http://www.eolss.net/Eolss-sampleAllChapter.aspx>. Acesso em: jan/2017.
- ANDREOLI, C.V.; DALARMI, O.; LARA, A.I.; RODRIGUES, E.M.; ANDREOLI, F.N. Os Mananciais de Abastecimento do Sistema Integrado da Região Metropolitana de Curitiba – RMC. **Sanare**; Curitiba; **12** (12): p. 19-29, 1999.

- ATKINSON, T.C. Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills; Somerset; U.K. **Journal of Hydrology**. 35: p. 93–110, 1977.
- BAILLY, V.; MARTIN, J; SREATON, E.; LANGSTON, A. A methodology for assessing water transit time using temperature as a natural tracer. *Geol. Soc. Am. Abstracts with Programs* Vol. 41, N 7, 2011.p. 468.
- BETHKE, C.M.; JOHNSON, T.M. Paradox of groundwater age: Correction. **Geology**. 30 (4): p. 386–387, 2001.
- BORLAND. **TurboBasic – Basic compiler**. Borland International Inc., 1987.
- BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. Holden Day, San Francisco, CA, 1976. 575 p.
- CLARK, I.; FRITZ, P. **Environmental Isotopes in Hydrogeology**. New York, Boca Raton: Lewis Publishers, 1997. 328 p.
- DROGUE, C. Analyse statistique des hydrogrammes de décrue des sources karstiques. **J. Hydrol.**, 15, p.49-68.1972.
- FIORI, A.P. Tectônica e Estratigrafia do Açungui no Paraná. **Boletim IG–USP**. 23, 1992. P.55-74.
- FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorphology**. 2.ed. rev. e atual, 2007. 601p.
- FRANCO-MAGALHAES, A. O. B.; HACKSPACHER, P. C.; GLASMACHER, U. A.; SAAD, A. R. Rift to post-rift evolution of a “passive” continental margin: the Ponta Grossa Arch, SE Brazil. **International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)** 99, p.1599–1613, 2010.
- HARUM,T.; LEDITZKY, H.P.; REINSDORFF, S.; SACCON, P.; ZOJER, H.; LISBOA, A.A.; VAINE, J.L.; ROSA FILHO, E.F. da; GIUSTI, D.A.; MONASTIER, M.S.; RIBAS, A. Projeto Carste: Water Balance and Isotope Investigations in the Compartment Carste Aquifer of Colombo-Fervida (Curitiba/Pr). *In: XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Fortaleza. Anais*, 2000. p.10-22.
- HURST, H.E.; BLACK, R.P.; SIMAIKA, Y.M. **Long-Term Storage: An Experimental Study**. London, UK: Constable & Co,1965, 145 p.
- JORDAN, H.; FROEHLICH, K. Groundwater dating in monitoring groundwater resources. *Groundwater Monitoring and Management*. **IAHS Publ.** 173, 1990. p.139–151.
- LANDIM, P.M.B. **Análise Estatística de Dados Geológicos Multivariados**. Ed. Oficina de Textos, São Paulo, 2011. 208 p.
- LAROCQUE, M.; MANGIN, A.; RAZACK, M.; BANTON, O. Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large Karst aquifer (Charente, France). **Journal of Hydrology**. 205, n. 3–4, 1998. p.217–231.
- LISBOA,A. A.; BONACIM, E. A. Sistema aquífero cárstico: reservatório elevado da região metropolitana de Curitiba. **Sanare**. 4,, p. 26-30, 1995.
- NASCIMENTO, E. R.; REIS NETO, J. M.;REBELO, A. M. A. Parâmetros geomorfométricos do relevo no entendimento do nível de exposição dos sistemas cársticos na região limítrofe das bacias hidrográficas do Alto Iguau e do Alto Ribeira - Região norte de Curitiba - PR. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42p. 81-90 , 2012.
- NETO, D. C.; CHANG, H.K.; GENUCHTE. A Mathematical View of Water Table Fluctuations in a Shallow Aquifer in Brazil. **Groundwater** 54(1), p. 82 – 91, 2015.

- PADILLA, A.; PULIDO-BOSCH, A. Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis. **Journal of Hydrology**, 168, p. 73-89, 1995.
- ROSA FILHO E.F. da; GUARDA, M.J. Compartimentação hidrogeológica da Formação Capiru na região Norte de Curitiba--PR, Brasil. **Revista Águas Subterrâneas**. 22 (1), p. 67-74, 2008.
- ROSA FILHO, E.F.; POLIDORO, G.; HARUM, T.; LISBOA, A.A.; RIBAS, A.; ZOJER, H. **Projeto Carste. Relatório Conclusivo Final**. Instituto Joanneum Research/SANEPAR/SUDERHSA /UFPR/COMEC, 2002. 34p.
- SANEPAR. Companhia de Saneamento do Paraná. **Banco de Dados Hidrogeológico da Região de Colombo – PR**. 1998.
- SOARES, P.C.; BETTÚ, D.F.; FIORI, A.P. Complexidades de uma terminação de nappe: o sinforme de Colombo (PR), Brasil. In: Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos - Curitiba. **Anais**, v. X, 2005. p. 447-450.
- SOARES, P. C.; NOGUEIRA FILHO, J.; BONACIM, E. A. Um olhar geológico para a paisagem: Curitiba a Vila Velha (PR, Brasil). In: SIMPOSIO DE ROTEIROS GEOLÓGICOS DO PARANÁ, Ponta Grossa. **Anais do I Simpósio de Roteiros Geológicos do Paraná**. Curitiba: Soc. Bras. Geol - Núcleo do Paraná, v. 1, 2002. p. 87-96.
- SOARES, P.C.; RIFFEL, S.B.; FIORI, A.P. Geomorphological and Geophysical Evidences for Neotectonics, Central and Southern Brazil. In: 13 SNET/7th International Symposium on Tectonics, SBG. Campinas. **Anais**. 2011. p. 400-404
- SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B. Depósitos cenozóicos na região centro-sul do Brasil. **Notícia Geomorfológica**. 16 (31), p. 17-39, 1975.
- VESTENA, L.R.; KOBAYAMA, M. 2007. Water Balance in Karst: Case Study of the Ribeirão da Onça Catchment in Colombo City, Paraná State – Brazil. **Brazilian Archives of Biology and Technology** 50(5), p. 905-912, 2007.

Fluxo editorial:

Recebido em: 27.01.2017

Aprovado em: 12.04.2017



A revista *Espeleo-Tema* é uma publicação da Sociedade Brasileira de Espeleologia (SBE).
Para submissão de artigos ou consulta aos já publicados visite:

www.cavernas.org.br/espeleo-tema.asp