

PEQUENAS VARIAÇÕES PIEZOMÉTRICAS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Paulo Augusto Diniz Silva¹ & Celso de Oliveira Loureiro²

Resumo – É apresentada uma avaliação sobre os agentes naturais que alteram, periodicamente, a distribuição espacial da carga hidráulica dos aquíferos subterrâneos. O fenômeno hidrogeológico das oscilações potenciométricas pode ser observado em poços instalados tanto em aquíferos livres quanto confinados. Em qualquer caso, as oscilações temporais do nível d'água se apresentam na forma de um somatório de ondas, em um espectro de múltiplas frequências, com períodos e amplitudes variados, em virtude das distintas características dos agentes influentes. Entre os elementos naturais mais importantes, merecem destaque: mudanças climáticas com longos períodos; precipitações pluviométricas anuais; evapotranspiração; pressão atmosférica; vento; marés; fases da Lua; e, rotação da Terra. A análise do espectro de ondas, representativa destas oscilações em poços, pode auxiliar no entendimento dos respectivos fenômenos causais. Neste contexto, um interesse especial se concentra no segmento do espectro de maior frequência, com períodos diários, incluindo aí a influência da evapotranspiração, dos ventos, da rotação da terra, das pressões atmosféricas, e das marés. Em particular, neste trabalho, é reafirmada a hipótese de que uma análise detalhada do espectro de variação diária, do nível d'água em poços, pode auxiliar no desenvolvimento de metodologia para a determinação efetiva da taxa diária da evapotranspiração real.

Abstract – This paper presents a description about the natural agents that alter, periodically, the spatial distribution of the hydraulic head, within subsurface aquifers. The hydrogeological phenomenon of the potentiometric oscillations can be observed in wells installed, either in confined or unconfined aquifers. In any case, the temporal oscillations of the water level, in wells, resemble a sum of waves, with a spectrum of multiple frequencies, with different periods and amplitudes, due to the distinct characteristics of the influent agents. The important elements are: long term climatic changes; annual precipitation regime; evapotranspiration; atmospheric pressure; wind; tides; moon phases; and, Earth rotation. A wave spectrum analysis, regarding these groundwater level oscillations, in wells, could help to understand the influence of the respective causal agent. In this context, a special interest is focused on the higher frequency segment of the spectrum, with daily periods, including the influence of: evapotranspiration; wind action; planet rotation; atmospheric pressure; and tides. More specifically, in this paper, a hypothesis is reaffirmed. It is proposed that a detailed measurement and analysis of the groundwater level daily variation spectrum, in wells, could help in the development of a methodology to estimate the real evapotranspiration effective daily rate.

Palavras-chave: oscilações do nível d'água; oscilações piezométricas nas águas subterrâneas.

¹ M.Sc., Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás – CEFETGO. Professor Visitante no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Bairro Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30110-060, Tel.: 31-3238-1947, e-mail: pad@cefetgo.br.

² Ph.D., Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. do Contorno 842, 7º andar, Bairro Centro, Belo Horizonte, MG, Brasil, CEP 30110-060, Tel.: 31-3238-1884, e-mail: celso@desa.ufmg.br

1 INTRODUÇÃO

A distribuição espacial da carga hidráulica nos aquíferos subterrâneos passa continuamente por alterações temporais, de caráter pulsante e oscilatório. O fenômeno hidrogeológico das oscilações potenciométricas, assim caracterizado, pode ser observado em poços instalados tanto em aquíferos livres quanto confinados. Nestes poços, o nível da água subterrânea, seja ele representativo da superfície freática de um aquífero livre (não confinado), ou do potencial hidráulico medido pontualmente em um aquífero livre ou confinado, varia continuamente com o tempo, devido à ação de agentes naturais e de eventuais atividades antrópicas.

Em qualquer caso, as variações temporais oscilatórias do nível d'água nos poços se apresentam na forma de um somatório de pulsos e de ondas contínuas, em um espectro de múltiplas frequências, com períodos e amplitudes variados, em virtude das distintas características dos agentes influentes, os quais atuam em conjunto (simultaneamente ou em seqüência), porém de maneira independente. Entre os elementos naturais mais importantes, merecem destaque: mudanças climáticas seculares, de períodos longos; regimes pluviométricos anuais, e os conseqüentes regimes de recarga das águas subterrâneas; evapotranspiração; pressão atmosférica; ventos; marés marítimas e terrestres; fases da Lua; e, rotação da Terra. Com relação às eventuais atividades humanas, podem ser citadas, entre outras: bombeamento em poços; exploração regular de água subterrânea; super-exploração de águas subterrâneas; rebaixamentos da superfície freática, em projetos de mineração e de engenharia em geral; irrigação; armazenamento artificial de água subterrânea; e, alterações da cobertura do solo.

A análise do espectro de ondas, representativo das oscilações do nível d'água em poços subterrâneos, pode auxiliar no entendimento dos respectivos fenômenos causais.

Neste contexto, um interesse especial se concentra no segmento do espectro de maior frequência, com períodos diários, incluindo aí a influência da evapotranspiração, da ação dos ventos, da rotação da terra, das pressões atmosféricas, e das marés.

Apresenta-se, então, neste trabalho, uma breve revisão sobre o tema das oscilações potenciométricas nos aquíferos subterrâneos, com o objetivo de trazer um foco sobre os agentes naturais de maior frequência, com períodos em torno de (ou menores que) um dia. Justifica-se que um conhecimento detalhado deste sub-domínio espectral, com períodos diários, possa trazer luz sobre importantes agentes hidrogeológicos, incluindo aí a taxa diária da evapotranspiração.

Vale ressaltar que, entre todos os elementos variáveis do ciclo hidrológico, de interesse para os estudos hidrológicos e hidrogeológicos, quais sejam, as taxas de precipitação, interceptação superficial, deflúvio superficial, infiltração, evapotranspiração real, recarga e escoamento de base, é precisamente a taxa diária de evapotranspiração real que apresenta as maiores dificuldades

conceituais e técnicas para ser determinada experimentalmente, de maneira direta. Conseqüentemente, ainda existe uma expectativa na comunidade hidrológico/científica pelo desenvolvimento de metodologias que possam atender a este propósito de medir a taxa diária de evapotranspiração real, através de procedimentos diretos.

Assim, em particular, neste trabalho, é reafirmada a hipótese de que uma análise detalhada do espectro de variação diária do nível d'água em poços, em aquíferos livres, pode auxiliar no desenvolvimento de novas metodologias para a determinação efetiva da taxa diária da evapotranspiração real.

2 CARACTERIZAÇÃO DAS OSCILAÇÕES POTENCIOMÉTRICAS EM AQUÍFEROS

As variações temporais da distribuição espacial do potencial hidráulico nos aquíferos, tanto de ordem natural quanto antropogênica, podem ser caracterizadas de diferentes maneiras e perspectivas, incluindo aí, a natureza e as características dos agentes causais, a duração e frequência das oscilações e a amplitude das variações.

Segundo Custódio e Llamas (1983), os agentes que causam as variações do nível das águas subterrâneas, nos poços, podem ser classificados em **diretos** e **indiretos**, conforme os efeitos provocados no armazenamento dos aquíferos. Assim:

- **agentes diretos** – são aqueles que produzem variações do nível freático, ou na distribuição potenciométrica, em virtude da recarga e descarga de água, e das respectivas variações das condições de armazenamento, e estão relacionados, por exemplo, com os seguintes fenômenos: variações climatológicas sazonais e seculares; evapotranspiração; e, a influência ou efluência de cursos d'água; e,
- **agentes indiretos** – são aqueles que produzem variações do nível freático, ou na distribuição potenciométrica, sem atuar na recarga e na descarga de água dos aquíferos, tais como: pressão atmosférica; presença de bolhas de ar oclusas; marés terrestres e oceânicas; e, cargas externas, entre outros.

Ainda de acordo com os mesmos autores, as variações do nível das águas subterrâneas, nos poços, podem ser classificadas, quanto à duração e frequência, em três grupos, quais sejam:

- **oscilações rápidas**, com períodos relativamente curtos, variando de cerca de um minuto, a pouco mais de um dia;
- **oscilações médias**, com períodos semanais; e,
- **oscilações lentas**, com períodos longos, que se manifestam, em ciclos semestrais, anuais ou seculares.

Aqui também poderia ser acrescentado que, em termos da escala, ou da amplitude das variações, as oscilações potenciométricas se classificam em três grupos, quais sejam:

- *pequenas amplitudes*, da ordem de milímetros;
- *amplitudes médias*, da ordem de centímetros a decímetros; e,
- *amplitudes grandes*, da ordem de metros a dezenas de metros.

3 OSCILAÇÕES POTENCIOMÉTRICAS RÁPIDAS

O subgrupo das oscilações potenciométricas rápidas, com períodos que variam desde minutos a pouco mais de um dia, desperta um interesse especial aos estudos e procedimentos hidrogeológicos. Estão incluídos neste subgrupo, os agentes naturais diretos (evapotranspiração) e indiretos (pressão barométrica, ventos, marés), cujas ações induzem variações potenciométricas, com magnitudes variáveis, de pequena a média, ou seja, da ordem de milímetros a alguns decímetros. O interesse neste subgrupo se dá em virtude do potencial de interferência que estas oscilações podem trazer na interpretação de resultados de testes hidrogeológicos de campo. Além disso, o interesse também existe devido à influência de um grande número de agentes causais naturais e à possibilidade de utilizar os dados registrados das oscilações como uma ferramenta para interpretar e decifrar a ação temporal individual de cada um destes agentes causais.

3.1 Variações devidas à evapotranspiração

O termo “evapotranspiração” foi cunhado para representar, em conjunto, os fenômenos hidrológicos conjugados da “evaporação” da água presentes nos solos e da perda de água pela cobertura vegetal do solo, através da “transpiração” das plantas. Trata-se de um dos elementos fundamentais do balanço hídrico no solo, envolvendo: precipitação, interceptação e evaporação direta na camada de cobertura vegetal, escoamento superficial, infiltração no solo, evapotranspiração e recarga dos aquíferos subterrâneos. Em termos gerais, a evapotranspiração constitui uma das variáveis envolvidas na equação do balanço de energia e na equação do balanço hídrico na superfície terrestre.

Os aquíferos livres apresentam, muitas vezes, flutuações do nível freático, as quais podem ser atribuídas aos efeitos combinados da evapotranspiração. Trata-se de um fenômeno exclusivos dos aquíferos livres, já que os sistemas confinados não estão expostos diretamente à atmosfera.

Para Custódio e Llamas (1983), o efeito da evapotranspiração é desprezível, exceto quando o nível freático se encontra a, pelos menos, um metro da superfície do terreno. Segundo os autores, as variações do nível das águas subterrâneas, excepcionalmente, excedem 10 centímetros. Em algumas raras ocasiões, o efeito da evapotranspiração pode alcançar superfícies freáticas situadas a até 10 metros de profundidade, desde que existam plantas freatófitas. De acordo com os mesmos autores,

em primeira aproximação, a amplitude da variação diária do nível das águas subterrâneas não pode ter valor superior ao valor da taxa de evapotranspiração diária, dividida pela porosidade efetiva do aquífero.

Vários pesquisadores vêm propondo modelos para estimar a taxa de evapotranspiração diária, baseados na variação do nível freático, em aquíferos livres. Dentre eles, destacam-se os trabalhos de White (1932), citado por Todd (1959), por seu pioneirismo e de Bauer et al. (2003), por ser uns dos trabalhos mais recentes.

No primeiro trabalho, o método proposto tem, como base, a hipótese de que o efeito da evapotranspiração seria desprezível, no período de tempo, da meia noite até às quatro horas da manhã. Segundo o referido autor, durante este período, a variação medida da superfície freática seria causada apenas pelo efeito resultante da recarga e descarga do aquífero. Também foi proposto que o nível freático, durante este intervalo de tempo, se aproximaria do valor médio representativo de todo o dia. Assim, com estas hipóteses, um método foi proposto para separar a influência da contribuição da recarga/descarga, nas oscilações medidas da superfície freática e, com isso, estimar a parcela da taxa de evapotranspiração efetivamente realizada.

Já no segundo trabalho, os autores apresentaram um estudo de caso, descrevendo a metodologia empregada para estimar a taxa da evapotranspiração diária a partir da variação do nível da água subterrânea, numa bacia hidrográfica. Foram obtidas taxas de evapotranspiração de 0,06 a 4,3 mm/dia. Estes resultados foram comparados às outras metodologias de estimação (satélites e perfilagens de isótopo etc.) e dados como satisfatórios.

Pessoa e Loureiro (2005), e Fernandes e Loureiro (2005), têm verificado a flutuação diária do nível da superfície freática, em aquíferos livre relativamente profundos, com profundidades variando de 30 a mais de 100 metros, e acreditam que esse comportamento da superfície freática, também, possa ser atribuído ao fenômeno da evapotranspiração, tal como as manifestações já observadas em aquíferos mais rasos. Na Figura 1 é apresentado um exemplo das oscilações diárias da superfície freática registradas em um poço profundo, com mais de 100 metros, instalado no aquífero cárstico de Lagoa Santa – MG. Pode-se observar que estas oscilações descrevem uma função periódica, de variação rápida, do tipo de uma senóide, com amplitude média em torno de 15 cm, cujos meio-períodos refletem o fenômeno de retirada (ramo descendente) e de reposição (ramo ascendente) de água da superfície freática, em um fotoperíodo diário (incidência de radiação solar).

Estas observações sugerem uma perspectiva do fenômeno da taxa diária de evapotranspiração real poder ser quantificado a partir de um elaborado sistema de medição das oscilações do nível de água subterrânea, em poços de variadas profundidades, instalados em aquíferos livres, desde que as medidas de nível sejam realizadas em intervalos reduzidos de tempo, da ordem de minutos, e com precisão suficiente para registrar variações na ordem de 0,1mm.

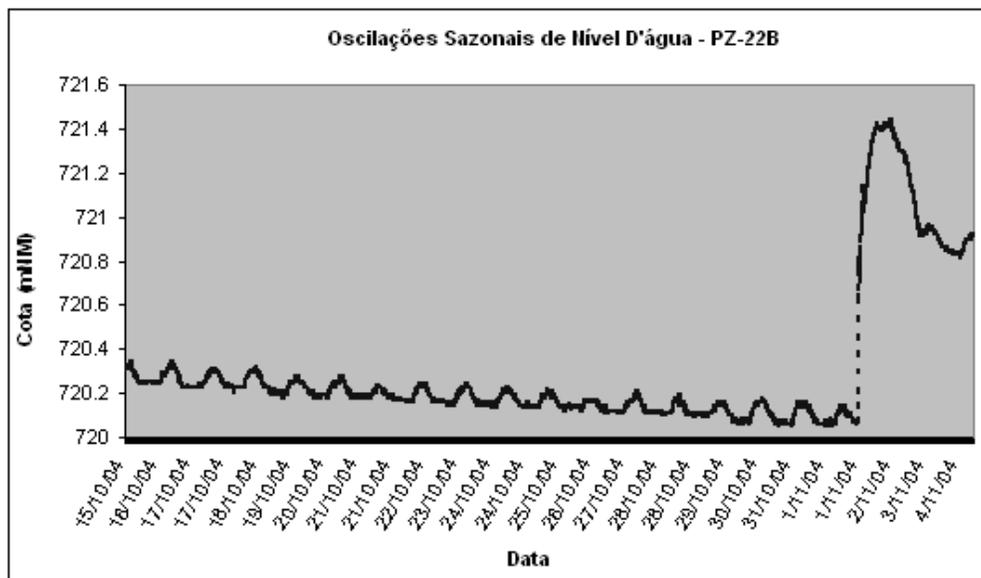


Figura 1: Exemplo de oscilações diárias da superfície freática – medidas realizadas em poço com mais de 100 metros de profundidade, instalado no aquífero cárstico de Lagoa Santa, Minas Gerais (Pessoa e Loureiro, 2005).

3.2 Variações Barométricas

Os efeitos das variações da pressão atmosférica sobre as oscilações do nível d'água, em poços de águas subterrâneas, são mais perceptíveis nos aquíferos confinados do que nos aquíferos livres.

De fato, as variações barométricas produzem flutuações consideráveis no nível d'água de poços ou de piezômetros, instalados nos aquíferos confinados. A relação entre a variação do nível de água e a pressão atmosférica é inversa, ou seja, para um aumento na pressão atmosférica é produzindo um decréscimo dos níveis de água, e reciprocamente.

A avaliação deste efeito pode ser feita a partir da eficiência barométrica, definida por Davis e DeWiest (1966) como sendo quociente adimensional entre a variação do nível d'água no poço, pela variação da carga hidráulica de pressão (variação da pressão atmosférica). Quanto mais confinantes e impermeáveis são os leitos de confinamento do aquífero, mais alta será a eficiência barométrica, e conseqüentemente, maiores serão as magnitudes das variações no nível d'água exibidas pelos poços de observação. Na literatura, os valores típicos de eficiência barométrica, para os aquíferos confinados, são da ordem de 0,8, enquanto que, para os aquíferos semiconfinados, estes valores são da ordem de 0,2 a 0,4.

Custódio e Llamas (1983) relatam que as variações na pressão atmosférica raramente superam 0,026 atm. ou 2,634 kPa, e que, para uma eficiência barométrica máxima (igual a 1), as respectivas variações do nível das águas subterrâneas, nos poços instalados em aquíferos confinados, atingem limites da ordem de 25 centímetros, aproximadamente.

Teoricamente a eficiência barométrica nos aquíferos livres é igual a zero, visto que as variações da pressão atmosférica são transmitidas diretamente ao nível da água, tanto do aquífero quanto do poço, não induzindo, portanto, nenhuma flutuação. No entanto, autores como Bianchi e Haskell (1966) e McWhorter (1971), citados por Freeze e Cherry (1979) e Hare e Morse (1977), reconheceram que, em situações específicas, devido à presença de bolhas de ar na franja capilar e na parte superior da zona saturada, os aquíferos não confinados, e rasos, podem experimentar variações nos níveis das águas subterrâneas induzidas pelas variações barométricas. As alterações do nível d'água nos poços de observação, instalados nestes aquíferos, seria, então, o resultado de uma compressão diferenciada das fases, líquida e gasosa, do meio poroso saturado, com a conseqüente alteração física, do meio poroso, e a também conseqüente variação do nível freático. Geralmente, esta anomalia atinge valores da ordem de um a três centímetros e desaparece em poucas horas ou dias, na medida em que o ar aprisionado escapa para a zona não saturada e para a atmosfera.

3.3 Marés Terrestres

Robinson (1939) e Richardson (1956), citados por Todd (1959), observaram pequenas flutuações regulares e semidiurnas nas superfícies piezométricas de aquíferos confinados, localizados a grandes distâncias do oceano, e atribuíram estas flutuações às marés terrestres, resultantes da atração exercida sobre a crosta terrestre, principalmente pela Lua. Na Figura 2 estão mostradas as flutuações, durante um ciclo lunar, após a correção das variações da pressão atmosférica, em um poço de 256 metros de profundidade, instalado em um aquífero confinado.

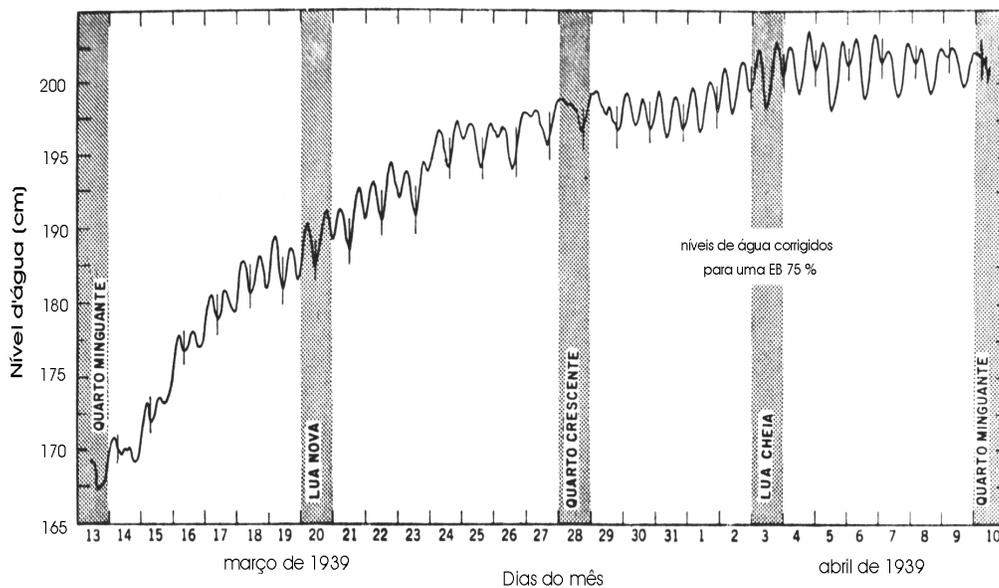


Figura 2: Flutuações do nível d'água em um aquífero confinado produzidas por marés terrestres. (Segundo Robinson, 1939, modificado de Todd, 1959).

Chama-se atenção para a Figura 2, na qual se apresentam dois eventos distintos de variação de nível d'água, registrados simultaneamente, no referido poço de observação. Enquanto o nível d'água vai aumentando, descrevendo uma trajetória da cota de 165 a 200 centímetros, durante todo o período de tempo, possivelmente devido a uma recarga, também são registradas as oscilações de pequenas amplitudes das marés terrestres. Quanto a estas últimas, pode-se perceber que, após a culminação da lua cheia e da lua nova, as amplitudes de variação do nível d'água são maiores do que nas outras fases lunares. Geralmente, estas amplitudes são da ordem de três a cinco centímetros.

Segundo Petroni (2005), a variação das marés com as fases lunares pode ser explicada pelo que se entende por maré de Sizígia e maré de Quadratura. Assim, quando a maré solar e a maré lunar atuam simultaneamente e, se a Terra, a Lua e o Sol estiverem aproximadamente alinhados, nestas condições, ocorrem as marés mais altas do mês lunar, denominadas de maré de Sizígia. Em consequência do retardo da propagação das marés, a maré de Sizígia surge após a lua nova e a lua cheia. Do contrário, denomina-se maré de Quadratura, quando a Lua e o Sol se encontram dispostos a 90° um do outro, em relação à Terra, cujas ações não são alinhadas e, portanto, as magnitudes destas marés são menores (menos de 3 cm). Estas marés ocorrem imediatamente depois da fase lunar do quarto crescente e do quarto minguante.

3.4 Marés Oceânicas

Denominam-se marés oceânicas, as flutuações periódicas do nível do mar devido à ação gravitacional do Sol e da Lua sobre as massas de águas que cobre a superfície terrestre. Segundo Petroni (2005), as marés oceânicas são produzidas a partir da diferença entre força de atração de uma partícula de água sobre a superfície terrestre e aquela que teria no centro da Terra, considerando a combinação das forças atrativas entre os corpos celestes, a revolução da lua ao redor da Terra e o movimento do conjunto Terra-Lua ao redor do Sol. O resultado desta diferença é o aparecimento de forças tangenciais, que não podem ser absorvidas pela água, fazendo com que a água se deforma para alcançar o equilíbrio. Durante o processo de deformação as marés se manifestam como flutuações no nível dos mares.

Segundo Jacob (1950), citado por Custódio e Llamas (1983), um aquífero confinado, de grande extensão e conectado hidraulicamente com o mar, é influenciado pelas marés oceânicas. O efeito destas são diretas. Isto é, quando o nível do mar aumenta, o nível das águas subterrâneas aumentam, e assim sucessivamente. O autor demonstrou o mecanismo desta variação, assumindo que o nível do mar varia com um movimento harmônico simples, e que uma seqüência de ondas de aparência senoidal se propaga para o interior deste aquífero.

Custódio e Llamas (1983) reconhecem que este mesmo mecanismo também pode ser aplicável, com boa aproximação, às flutuações do nível d'água de um aquífero não confinado, se o

intervalo de flutuação for pequeno em comparação com a espessura saturada. Na Figura 3 são apresentados os esquemas ilustrativos do efeito das marés para diferentes aquíferos.

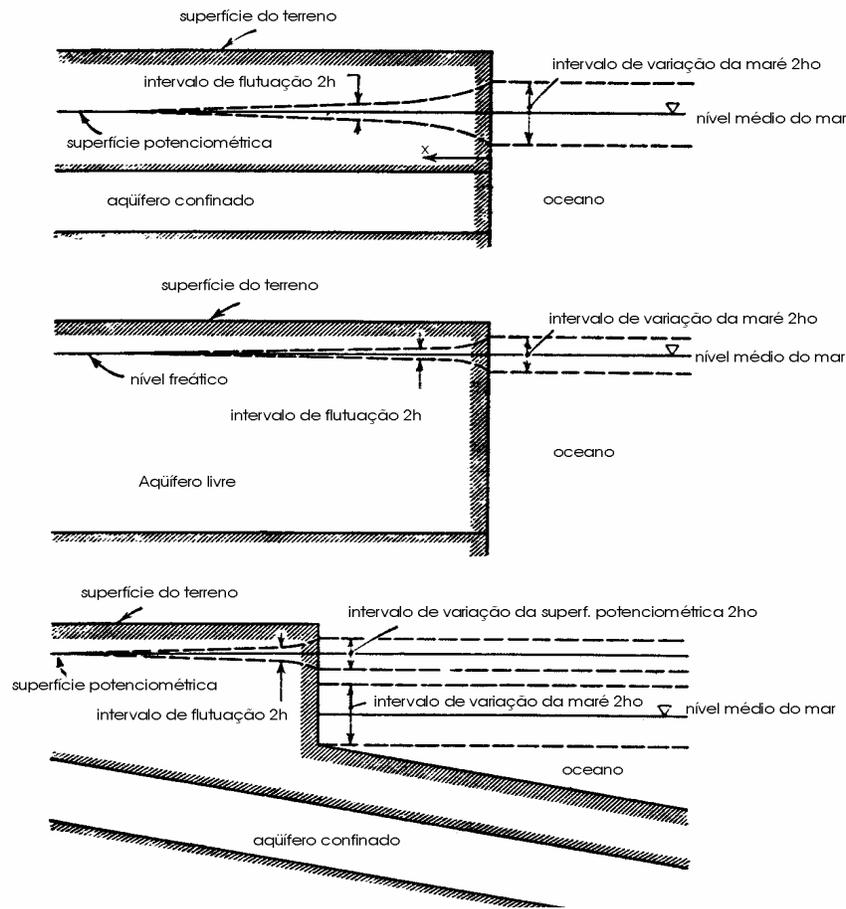


Figura 3: Variações do nível d'água subterrânea produzida por marés oceânicas. (Modificado de Todd, 1959).

A avaliação deste efeito pode ser feita a partir da eficiência da maré. De acordo com Jacob (1940), citado por Todd (1959), a eficiência da maré é a relação adimensional entre a amplitude de variação do nível piezométrico e da maré. Na literatura são registradas magnitudes da ordem de 5 a 30 centímetros, na variação do nível das águas subterrâneas, devido às marés oceânicas. Esta ordem de grandeza é dependente, dentre outras coisas, da amplitude das marés (maré alta e baixa) e da localização do poço de observação em relação à costa.

3.5 Ventos

A ação dos ventos, no nível do solo, e sobre o topo dos poços, pode causar flutuações no nível d'água medido nos poços. Este efeito é idêntico ao da ação de uma bomba de vácuo. Quando uma rajada de vento sopra sobre o topo do revestimento, a pressão de ar dentro do poço é repentinamente rebaixada e, como consequência, o nível d'água nestes se eleva rapidamente. Posterior à passagem

da rajada de vento o nível d'água se restabelece. Na Figura 4 é ilustrado o efeito do vento em um poço de observação.

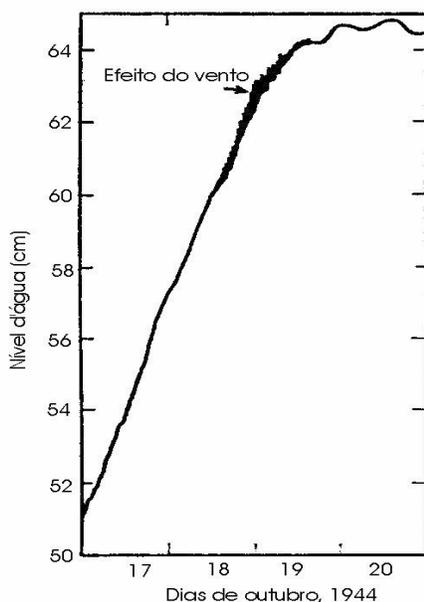


Figura 4: Efeito de vento no topo de um poço. (Segundo Paker e Stringfiel, 1950, modificado de Todd, 1959).

A magnitude das variações do nível d'água, no poço de observação, devido à ação dos ventos, é bastante variável e de pouca expressão. Um valor aproximado, ilustrativo deste efeito, pode ser obtido da Figura 4, indicando amplitudes menores do que 0,5 cm.

3.6 Cargas Externas

Os efeitos de uma sobrecarga temporária, tal como a passagem de veículos pesados, a detonação de explosivos e a ocorrência de terremotos, como exemplos, podem causar variações repentinas no nível d'água dos aquíferos, tanto confinados quanto não confinados (desde que este último apresente comportamento elástico) e serem percebidos pelos poços de observação localizados nas imediações da aplicação da carga. Presume-se que estas flutuações resultem da compressão e expansão elásticas dos aquíferos, devido à passagem das ondas de pressão, sem que haja uma deformação permanente do meio. Nestes casos, o nível d'água de um poço se eleva quando um aquífero elástico é solicitado por uma sobrecarga temporária e de curta duração.

Jacob (1939), citado por Todd (1959), faz uma descrição deste fenômeno a partir de um esquema ilustrativo apresentado na Figura 5.

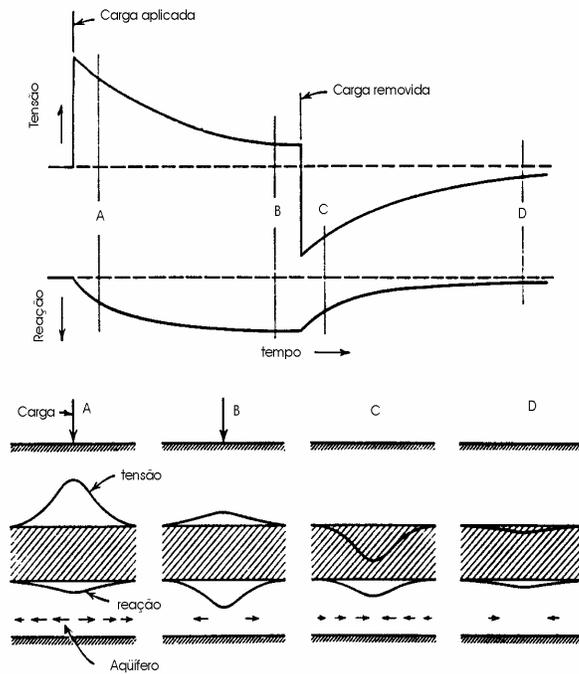


Figura 5: Diagrama esquemático da variação do nível d'água subterrânea, devido à aplicação de um carregamento pontual. (Modificado de Todd, 1959).

Da Figura 5, pode-se acompanhar que:

- durante o intervalo A e B, a sobrecarga ($\Delta\sigma$) aplicada no terreno vai sendo propagada pelo interior do maciço, na forma de sino, acarretando um acréscimo tanto na poro-pressão (pressão hidrostática, Δp_w) como na tensão efetiva (tensão intergranular, $\Delta\sigma_e$) do meio. Em resposta à sollicitação, a água armazenada no aquífero escoar para locais de menor pressão hidrostática (por exemplo, na direção dos poços de observação, elevando seus níveis d'água). Na medida em que o volume de água escoar, o excesso de poro-pressão vai sendo gradativamente diminuído e o esqueleto estrutural vai assumindo o excedente de tensão; e,
- após a remoção da carga, intervalo C e D, o estado de tensão do maciço vai sendo gradativamente restabelecido, na medida em que o volume de água, ora expulso, retorna para o local de origem. A pressão hidrostática e a tensão efetiva vão restabelecendo seus valores originais.

4 ANÁLISE COMPARATIVA - AGENTES NATURAIS DE OSCILAÇÕES RÁPIDAS

Ao longo do texto foi apresentado um conjunto de fenômenos que provocam variações nos níveis das águas subterrâneas, com oscilações rápidas, medidas em poços instalados em aquíferos livre e confinados. Dentre estes agentes causais, destacam-se: a evapotranspiração, a variação

barométrica, as marés terrestres e oceânicas, as ações do vento, e a ação de cargas externas. Na Tabela 1 é apresentado um resumo das causas de variação rápida do nível das águas subterrâneas e suas respectivas magnitudes, registrando sua típica ocorrência, duração e frequência.

Especificamente para o caso dos aquíferos livres, os agentes naturais causais de maior expressão sobre as oscilações rápidas dos níveis d'água em poços se restringem à evapotranspiração, à ação das marés e à ação das variações da pressão barométrica. Os seus efeitos são observados simultaneamente, em períodos diários, e em uma escala de amplitude de até alguns decímetros.

Tabela 1: Caracterização das oscilações potenciométricas rápidas no nível das águas subterrâneas.

Agente Causal	Ocorrência ^(*)	Classificação			
		Quanto ao Agente Causal	Quanto à Frequência	Quanto ao Período	Quanto à Amplitude da Oscilação [cm]
Evapotranspiração	AL	Direto	Rápida	Diário	25
Maré terrestre	AC	Indireto	Rápida	Diário	3 a 5
	AL				
Maré oceânica	AC	Indireto	Rápida	Diário	5 a 30
	AL				
Pressão atmosférica	AC	Indireto	Rápida	Diário	25
	AL				6
Ventos	AC	Indireto	Rápida	Minutos	< 0,5
	AL				
Cargas externas	AC	Indireto	Pulsos Isolados	---	3
	AL				1

^(*)AL = Aquífero Livre; AC = Aquífero Confinado

A soma destes efeitos apresenta-se na forma de um espectro de múltiplas frequências, com períodos e amplitudes variadas, em virtude das distintas características que cada fenômeno desenvolve. A análise espectral do fenômeno, como um todo, deve ser feita a partir de um modelo de soma de séries temporais múltiplas, onde cada componente do espectro possa ser identificado, separado e quantificado.

Halford (2006) vem utilizando a análise espectral destas ondas, e as definições da eficiência barométrica e da eficiência da maré, para isolar, do espectro total das ondas, as influências destas componentes de variação do nível d'água, com o objetivo de depurar a metodologia de análise de testes de bombeamento de longa duração.

No mesmo sentido, acredita-se que o componente de variação devido à evapotranspiração, possa ser identificado e quantificado, na medida em que for alcançado um passo adiante na análise

espectral dos fenômenos em questão. Espera-se, assim, que uma análise mais detalhada do espectro de variação diária, do nível d'água em poços instalados em aquíferos livres, possa auxiliar no desenvolvimento de metodologia para a determinação efetiva da taxa diária da evapotranspiração real.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi feita uma breve revisão sobre o tema das oscilações potenciométricas nos aquíferos subterrâneos, as quais se apresentam como um somatório de ondas de espectro variado, com frequências, períodos e amplitudes diversas, e condicionadas por agentes causais hidrogeológicos de naturezas distintas. Mais especificamente, foram considerados os agentes naturais de maior frequência, com períodos em torno de (ou menores que) um dia. Justifica-se que um conhecimento detalhado deste sub-domínio espectral, com períodos diários, possa trazer luz sobre importantes agentes hidrogeológicos, incluindo aí a taxa diária da evapotranspiração.

Assim, em particular, neste trabalho, é reafirmada a hipótese de que uma análise detalhada do espectro de variação diária do nível d'água em poços, em aquíferos livres, possa auxiliar no desenvolvimento de novas metodologias para a determinação efetiva da taxa diária da evapotranspiração real.

6 BIBLIOGRAFIA

BAUER P. et al. Estimation of the Evapotranspiration Rate from Diurnal Groundwater Level Fluctuations in the Okavango Delta, Botswana. *Journal Hydrology*, 2003. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 15 abril 2006.

CUSTÓDIO, E. G. e Llamas, M. R. (1983). *Hidrologia Subterrânea*. Ediciones Omega S. A. Barcelona, Espanha, v. 1, 1153 p.

DAVIS, S. N. e DeWiest, R. J. M. (1966). *Hidrogeology*. John Wiley & Sons, Inc. USA, 436 p.

FERNANDES, R. A. *Gestão Integrada de Águas Subterrâneas: Critérios Gerais de Definição e Caracterização de Áreas e Estratégias de Abastecimento, para o Atendimento de Demandas Humanas e Proteção de Sistemas Aquíferos*. Tese de Doutorado; Curso de Pós-Graduação em

saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos; Escola de Engenharia da UFMG; Belo Horizonte, MG. Novembro de 2005. Orientador: Prof. Celso de Oliveira Loureiro.

FREEZE, R. A. e Cherry, J. A. (1979). Groundwater. Prentice Hall, Inc. USA, 604 p.

HALFORD, K. J. Documentation of a Spreadsheet for Time-Series Analysis and Drawdown Estimation. Carson City: U. S. Geological Survey, 2006, 38 p. Report 2006-5042. Disponível em: <http://www.usgs.gov/>. Acesso em: 15 maio 2006.

HARE, P. W. e Morse, R. Water-level Fluctuation due to Barometric Pressure Changes in an Isolated Portion of an Unconfined Aquifer. Ground Water, Westerville, v. 35, n^o 4, p 667-671, July-August. 1997.

PESSOA, P. F. P. Hidrologia dos Aquíferos Cársticos da Região de Lagoa Santa. Tese de Doutorado; Curso de Pós-Graduação em saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos; Escola de Engenharia da UFMG; Belo Horizonte, MG. Novembro de 2005. Orientador: Prof. Celso de Oliveira Loureiro.

PETRONI, R. V. (2005). Hidráulica Marítima y de Estuarios. Editorial Dunken. Buenos Aires, Argentina, 544 p.

TODD, D. K. (1959). Hidrologia de Águas Subterrâneas. Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, Brasil, 319 p.