

Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência do Solo

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral, Sylvana Melo dos Santos, Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho

Departamento de Engenharia Civil – UFPE
jcabral@ufpe.br, sylvanainsfran@yahoo.com.br, ivaldo@ufpe.br

Recebido: 18/08/05 revisado: 17/10/05 aceito: 07/04/06

RESUMO

Um dos problemas que compromete a sustentabilidade do uso de água subterrânea é o risco de subsidência do solo que precisa ser analisado com cuidado para prevenir ou mitigar prejuízos em edificações e pavimentos.

Uma das causas de subsidência do solo é a retirada de fluido de vazios subterrâneos (poros ou cavidades). Nos grandes centros urbanos e em áreas destinadas à agricultura e às atividades industriais, a exploração demasiada de água subterrânea, que resulta num ritmo de extração superior à capacidade de recarga, constitui a causa mais comum de subsidência, como pode ser observado na grande quantidade de registros do fenômeno em todo o mundo.

A discussão sobre os mecanismos de ocorrência indica a necessidade de maior investigação sobre o tema, envolvendo aquíferos cársticos e sedimentares, para o desenvolvimento de ferramentas de previsão e simulação de cenários, de estratégias de monitoramento e de técnicas de mitigação do problema.

Palavras-chave: *subsidência do solo, exploração de água subterrânea, sustentabilidade de aquíferos.*

INTRODUÇÃO

O uso de água subterrânea tem aumentado constantemente nas últimas décadas no Brasil. Entre as causas desse aumento podem ser citadas: o aumento de demanda de água, o comprometimento das águas de superfície, a poluição de diversos mananciais de superfície, o melhor conhecimento dos aquíferos e o aprimoramento das empresas de perfuração de poços.

Ao se bombear intensamente a água subterrânea, altera-se o equilíbrio inicial do aquífero e as consequências precisam ser analisadas para garantir um uso sustentável.

SUSTENTABILIDADE DE AQUÍFEROS

O uso sustentável de aquíferos vem sendo debatido em diversos países nos últimos anos. A idéia de desenvolvimento sustentável para atender as necessidades do presente sem comprometer as necessidades das futuras gerações, de acordo com o relatório Brundtland, foi gradualmente se estendendo para os vários recursos naturais e atualmente os hidrólogos, os hidrogeólogos, os administradores de recursos hídricos procuram aplicar o mesmo conceito para as águas subterrâneas.

O tema das águas subterrâneas, dentro do contexto de desenvolvimento sustentável passa atu-

almente por um processo de debate a nível conceitual e a nível operacional em diversos lugares do mundo, bem como passa por um processo de pesquisa científica onde se procura analisar e calcular os efeitos do bombeamento das águas subterrâneas sobre os outros recursos naturais e os ecossistemas (Cabral, 2004).

O conceito de bombeamento sustentável já vem sendo analisado e discutido por algumas décadas, com nomes diferentes como bombeamento seguro ou reservas exploráveis. O objetivo neste caso é determinar quanto pode ser bombeado indefinidamente de um aquífero sem fazer mineração das reservas hídricas, onde mineração de água se entende como o prolongado e progressivo decréscimo dos volumes armazenados, sem possibilidade de reposição num tempo razoável.

Este conceito coloca o foco só no aquífero e é bem distinto do conceito de desenvolvimento sustentável ou sustentabilidade (Devlin & Sophocleous, 2004). Para o desenvolvimento sustentável são analisadas todas as influências que o bombeamento da água subterrânea pode acarretar nas águas superficiais e no meio ambiente como um todo.

A sustentabilidade requer o entendimento de que os problemas do mundo são interconectados e interdependentes de uma forma sistemática. Os objetivos econômicos e políticos de uma nação ou região não podem ser atingidos sem buscar os obje-

tivos sociais e ambientais. Além disso, deve-se buscar a distribuição justa dos recursos naturais tanto no presente como entre as gerações, tal que as atividades antrópicas não podem se apropriar de recursos naturais que sejam de interesse de outras pessoas ou de outras gerações. Se for imprescindível esta apropriação, que seja providenciada uma adequada forma de compensação.

Um dos problemas que compromete a sustentabilidade do uso de água subterrânea é o risco de subsidiência do solo que precisa ser analisado com cuidado para prevenir ou mitigar prejuízos em edificações e pavimentos. O presente artigo faz uma revisão do fenômeno de subsidiência em diversos países e analisa os mecanismos de subsidiência em aquíferos cársticos e aquíferos sedimentares devido à exploração excessiva de água subterrânea. A palavra “exploração”, apesar de não constar nos dicionários de português, é de uso corrente entre os hidrogeólogos, significando extração de água, para diferenciar de exploração no sentido de prospecção de minérios.

MECANISMOS DA SUBSIDÊNCIA

A subsidiência é um fenômeno de rebaixamento da superfície do terreno devido a alterações ocorridas nas camadas subterrâneas, ou seja, redução do nível do terreno devido à remoção de suporte subterrâneo.

A importância em se conhecer profundamente o fenômeno de forma a reconhecer sua ocorrência e aplicar medidas de prevenção e mitigação é evidente (Figura 1).

Do ponto de vista do mecanismo causador da subsidiência do solo, segundo Míngnorance (2000), pode-se subdividir as ocorrências em cinco grupos:

- devido à hidrocompactação,
- devido à dissolução de rochas e sais,
- devido à extração de água subterrânea,
- devido à extração de petróleo ou gás, e
- devido à atividade mineira.

Dependendo da origem do processo, os diferentes tipos de subsidiência têm características distintas com relação à extensão do fenômeno, condições geológicas favoráveis à sua ocorrência e máximas magnitudes atingidas.



Figura 1 - Importância da informação sobre a subsidiência do solo (traduzido de Abidin et al., 2001).

Do ponto de vista de aproveitamento de recursos hídricos, interessa os três primeiros itens que são descritos a seguir, dos quais os dois últimos associados à extração de água subterrânea constituem o objetivo do presente trabalho:

- Subsidiência devido à hidrocompactação: compreende um fenômeno de saturação rápida em depósitos finos não saturados e mal compactados. Nesses materiais, ocorre uma re-orientação das partículas do solo devido à adição de água. O solo então perde sua capacidade de suporte resultando numa consolidação devido a seu peso próprio. É um processo que pode atingir alguns metros de profundidade, comum em ambientes desérticos e em regiões semi-áridas. Normalmente é provocada por atividades humanas como irrigação, construção de pequenos reservatórios artificiais de água, construção de canais, entre outros.
- Subsidiência devido à dissolução de rochas e sais: ocorre devido a um fenômeno chamado carstificação. A carstificação é o processo do meio físico que consiste na dissolução de rochas pelas águas subterrâneas e superficiais, que resulta no processo de formação de cavernas subterrâneas. A carstificação é o processo mais comum de dissolução de rochas calcárias ou carbonáticas (calcário, dolomito, mármore), evaporitos (halita, gipsita, anidrita) e, menos comumente, rochas silicáticas (granito, quartzito).
- Subsidiência devido à extração de água subterrânea em aquíferos sedimentares porosos: resultante do bombeamento do fluido que reduz a pressão dos poros que ajudam a suportar as camadas sobrejacentes de solo. Essa redução de pressão dos poros é consequência do rebaixamento do nível da água.

A ocorrência de subsidência do solo ocorre em várias dimensões e pode envolver áreas de poucos metros até extensões quilométricas, em períodos variados. Scott (1979) relacionou escalas de tempo e dimensão para vários mecanismos de subsidência, Tabela 1. Conforme a escala de tempo e dimensão apresentada, a extração de água subterrânea está entre os agentes causadores, resultantes da atuação do homem, com maiores valores de extensão.

Tabela 1 – Escala de tempo e dimensão para vários mecanismos de subsidência (Scott, 1979)

Dimensão (km)	Tempo (anos)	Mecanismo
10 ² - 10 ³	10 ⁴	Ajustes isostáticos da crosta
	10 - 10 ²	Placas tectônicas
	10 - 10 ²	Exploração de água em grande escala
	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁶	Terremoto
10 - 10 ²	10 - 10 ²	Exploração de petróleo e gás
10 ⁰ - 10 ¹	10 - 10 ²	Extração de sólidos
10 ⁻¹ - 10 ⁰	10 - 10 ²	Carregamento da superfície, consolidação, hidrocompactação
10 ⁻¹ - 10 ⁰	10 ⁻⁷ - 10 ⁻⁶	Densificação por vibração
10 ⁻² - 10 ⁻¹	10 ⁻¹	Compactação

Os aquíferos consistem em unidades geológicas saturadas que contêm poros ou espaços abertos e permitem o fluxo de água entre eles. Podem ser constituídos tanto por rochas duras compactas (rochas ígneas e metamórficas), como por rochas sedimentares não consolidadas (areias e cascalhos) e de maior consistência (calcários). Junto com a condutividade hidráulica e o coeficiente de armazenamento, a porosidade constitui um dos principais parâmetros envolvidos no fluxo em meio contínuo. Neste contexto, os aquíferos podem ser classificados em contínuos, de porosidade primária, é o caso das rochas sedimentares, e descontínuos, de porosidade secundária, rochas ígneas e metamórficas. A porosidade primária corresponde à porosidade devido aos vazios originais da rocha e a porosidade secundária é resultante das fissuras e cavidades de dissolução que se desenvolvem após a formação da rocha. Apesar de ser de origem sedimentar, o calcário apresenta porosidade secundária.

Em valores financeiros, a subsidência devido à exploração de água subterrânea pode resultar em danos muito graves, uma vez que é a de maior ocorrência em regiões urbanizadas, quando pode acarretar

danos aos pavimentos de vias públicas, e às edificações, causando rachaduras ou inviabilizando seu uso. Os casos mais frequentes de subsidência registrados na literatura científica acontecem em áreas urbanas e dizem respeito à presença de aquíferos sedimentares. Casos de subsidência associados à ocorrência de aquíferos cársticos são menos frequentes, até mesmo porque essas localidades apresentam, naturalmente, restrições para assentamentos urbanos, em função dos referidos processos de dissolução das rochas carbonáticas.

AQUÍFEROS SEDIMENTARES

A ocorrência de subsidência em aquíferos sedimentares geralmente afeta grandes áreas, e compreende a forma mais extensa e custosa de subsidência, a nível mundial. O mecanismo de subsidência que ocorre em aquíferos sedimentares devido à exploração dos recursos hídricos subterrâneos é de fácil compreensão quando se considera que num cubo de solo, em que atua constantemente uma carga geostática, vale o Princípio das Tensões Efetivas - PTE proposto por Terzaghi (1925):

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p \quad (1)$$

onde:

σ'_{ij} é uma componente do tensor de tensões efetivas;

σ_{ij} é uma componente do tensor de tensões totais;

δ_{ij} é a função Delta de Kronecker;

p é a pressão no poro com fluido.

O PTE constitui o elo entre a exploração de água subterrânea e o fenômeno de subsidência. Dentro do aquífero a pressão neutra u , ou seja a pressão no poro preenchido com água, equivale à carga hidráulica. Quando a água é explorada do aquífero, a carga piezométrica e a pressão neutra diminuem e a tensão efetiva no aquífero aumenta, uma vez que a pressão total permanece constante. Isso é esquematizado na Figura 2, onde num determinado ponto P dentro do aquífero, antes do bombeamento, o solo está sujeito às tensões iniciais (σ_0, σ'_0, u) , tal que o peso das camadas de solo é suportada pela matriz sólida e pelo fluido simultaneamente. Com a contínua retirada dos recursos hídricos subterrâneos e o rebaixamento do nível da

água, verifica-se que, no mesmo ponto P, a carga geostática passa a ser suportada apenas pela matriz sólida. Este aumento na tensão efetiva resulta na compressão do solo e conseqüente subsidiência. De acordo com Scott (1979), considerando que a contração volumétrica de materiais granulares é quase irreversível, a superfície de subsidiência que ocorre como resultado da redução na pressão do fluido em uma camada subjacente pode raramente ser revertida.

Esse fenômeno pode acontecer tanto em aquíferos confinados quanto em aquíferos não confinados, para essa segunda situação a Figura 3 apresenta um esquema da ocorrência do fenômeno. Ao rebaixar o nível do aquífero inferior, a camada de argila drena a água e ocorre um recalque que acarreta um rebaixamento do nível do terreno (NT).

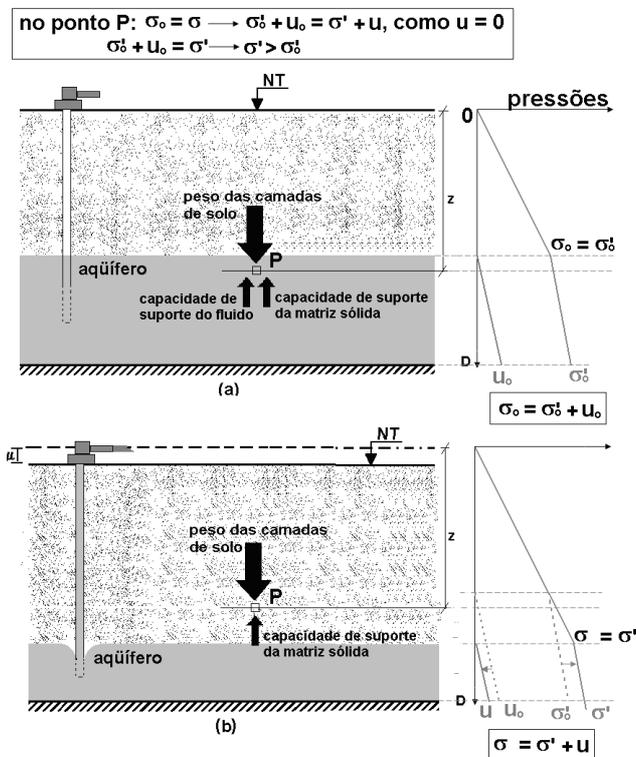


Figura 2 - Aquífero sedimentar não-confinado: (a) antes do bombeamento – tensões iniciais atuantes (σ_0, σ'_0, u); (b) após o bombeamento – tensões atuantes (σ, σ', u).

Os solos de granulação fina registram “na memória” as máximas tensões experimentadas por sua estrutura, que são comumente conhecidas como tensão de pré-consolidação. A tensão de pré-

consolidação, σ'_p , constitui o fator condicionante do comportamento da estrutura sólida do solo, nesse tipo de material, em resposta às solicitações de carga. Quando a tensão efetiva reduz e a pressão neutra aumenta o solo expande elasticamente. Por outro lado, quando a tensão efetiva aumenta e a pressão neutra diminui duas situações podem ser esperadas: a tensão efetiva é inferior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um deslocamento vertical recuperável ou elástico, ou, ao contrário, a tensão efetiva é superior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um significativo re-arranjo que resulta num deslocamento vertical irreversível ou inelástico.

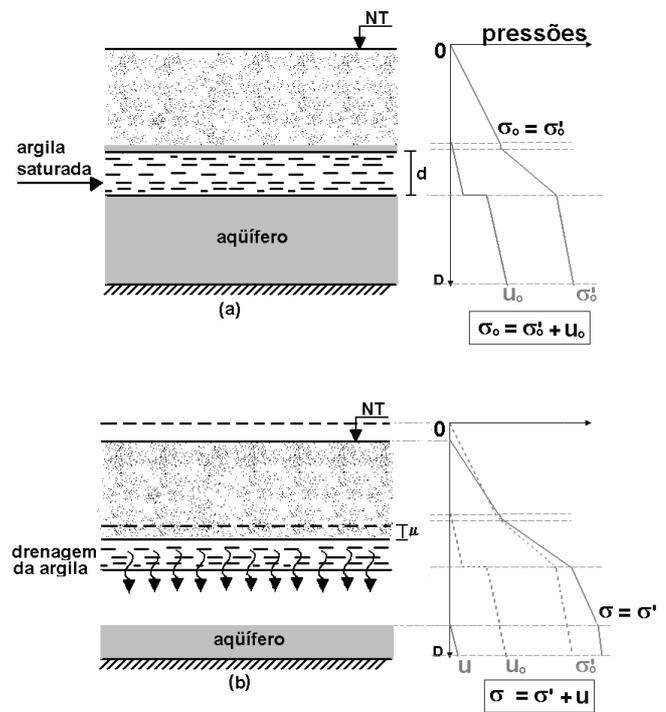


Figura 3 - Aquífero sedimentar confinado: (a) antes do bombeamento – tensões iniciais atuantes (σ_0, σ'_0, u); (b) após o bombeamento – tensões atuantes (σ, σ', u).

Este aumento na tensão efetiva resulta na compressão do solo e conseqüente subsidiência. De acordo com Scott (1979), considerando que a contração volumétrica de materiais granulares é quase irreversível, a superfície de subsidiência que ocorre como resultado da redução na pressão do fluido em uma camada subjacente pode raramente ser revertida.

Os solos de granulação fina, por outro lado, têm um comportamento mais complexo. Este tipo de solo registra “na memória” as máximas tensões experimentadas por sua estrutura, que são comumente conhecidas como tensão de pré-consolidação. Quando a tensão efetiva reduz e a pressão neutra aumenta o solo apresenta um comportamento previsível e expande elasticamente. Por outro lado, quando a tensão efetiva aumenta e a pressão neutra diminui, duas situações podem ser esperadas: a tensão efetiva é inferior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um deslocamento vertical recuperável ou elástico, ou, ao contrário, a tensão efetiva é superior à tensão de pré-consolidação e o aquífero experimenta um significativo re-arranjo que resulta num deslocamento vertical irreversível ou inelástico.

A complexa situação que envolve a combinação fluxo e deformações volumétricas compreende o conjunto de equações:

$$\sigma = \gamma \times D \quad (2)$$

$$\sigma' = f(n) \quad (3)$$

$$\sigma' = g(S_g, S_w) \quad (4)$$

$$S_g + S_w = 1 \quad (5)$$

onde:

γ é o peso específico do solo saturado;

D é a profundidade do ponto analisado;

n é a porosidade;

S_g, S_w correspondem ao grau de saturação do gás e da água, respectivamente;

f, g são funções que relacionam os parâmetros do solo.

O fluxo num aquífero sedimentar compreende, portanto, a movimentação do fluido através de seus poros e, as deformações volumétricas observadas neste maciço, resultam da variação da porosidade que, por sua vez, afeta a distribuição de pressões, que também está associada à condutividade hidráulica. A quantidade de subsidência em uma determinada área está, portanto, relacionada com a magnitude do rebaixamento do nível d'água, a porcentagem de argila presente no aquífero e ao período de tempo em que o nível d'água foi mantido rebaixado (Mingorance, 2000).

AQUÍFEROS CÁRSTICOS

A carstificação é o processo do meio físico que consiste na dissolução de rochas pelas águas subterrâneas e superficiais, que resulta no processo de formação de cavernas subterrâneas. A carstificação é o processo mais comum de dissolução de rochas calcárias ou carbonáticas (calcário, dolomito, mármore), evaporitos (halita, gipsita, anidrita) e, menos comumente, rochas silicáticas (granito, quartzito). A água presente num aquífero do tipo cárstico é encontrada preenchendo as fraturas abertas por dissolução dos calcários, a carstificação (Figura 4). Os problemas ambientais mais comuns associados aos relevos cársticos são a poluição da água subterrânea e os problemas de fundação (assentamento diferencial, erosão subsuperficial e colapso da superfície do terreno devido às cavidades subterrâneas). De acordo com a definição apresentada anteriormente, pode-se concluir que o fenômeno se origina na presença da água percolante dentro do aquífero, entretanto, a água da chuva, em combinação com o gás carbônico da atmosfera, constitui um meio ácido que tem a propriedade de dissolver, entre outras, as rochas compostas de carbonatos.

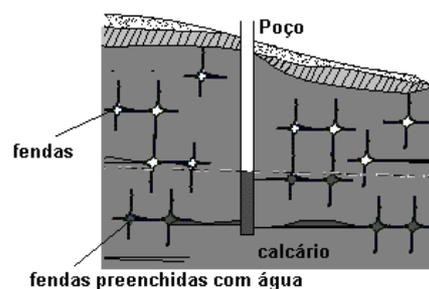


Figura 4 – Esquema de um aquífero cárstico

A carstificação é um fenômeno natural e freqüente em regiões de ocorrência de geologia cárstica, inclusive em algumas partes do mundo com essa característica, como no sudoeste dos Estados Unidos, onde por exemplo, vários colapsos de superfície ocorrem num ano (Scott, 1979). Com relação às condições de armazenamento e fluxo d'água de um aquífero cárstico, esse fatores são decorrentes da dissolução da massa carbonática ao longo dos seus planos de fraturamento. Por esse motivo e, ao contrário dos demais aquíferos, apresenta variação no volume de armazenamento, ao longo do tempo,

a medida que acontece desgaste da massa carbonática pelos processos de dissolução.

O processo de subsidência em aquíferos cársticos é discutido amplamente por pesquisadores de todo o mundo. Lamont-Black et al. (2002) realizaram um estudo sobre os problemas de subsidência potencialmente atribuídos à carstificação do calcário e apresentaram um esquema para o modelo conceitual dos mecanismos de subsidência. De acordo com Lamont-Black et al. (2002), a dissolução do calcário acontece quando estão presentes simultaneamente os seguintes componentes: calcário, não saturação de água, energia para movimentação da água através do sistema, abastecimento de água. Assim, os frequentes colapsos das superfícies em ambientes cársticos constituem sérios problemas ambientais tanto em áreas rurais como em áreas urbanas.

Do ponto de vista do processo físico, a subsidência de um aquífero cárstico acontece, normalmente, após um rebaixamento excessivo do nível d'água que resulta num agravamento das condições naturais e aumento na dissolução da rocha, queda da pressão da água subterrânea e conseqüente aceleração do carreamento de grãos do solo. Essa seqüência de acontecimentos pode resultar, em alguns casos, no desabamento do teto das cavidades seguido do rebaixamento do solo da superfície (Figura 5).

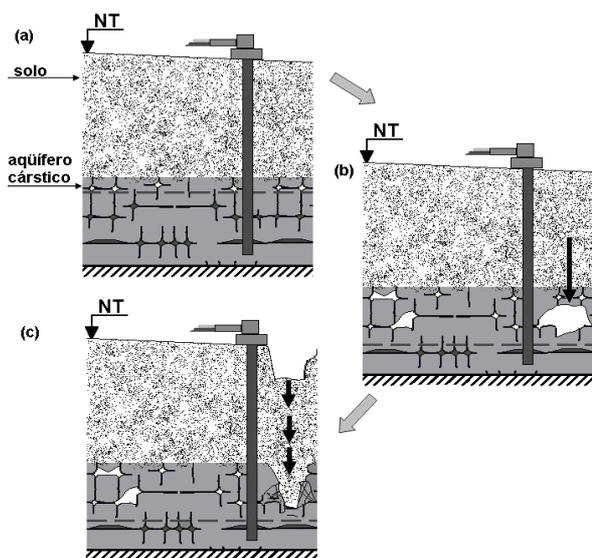


Figura 5: Colapso em aquífero cárstico: (a) início do bombeamento; (b) rebaixamento excessivo do nível d'água provocou o carreamento do material carstificado e o surgimento de novas cavidades; (c) desmoronamento das paredes e do teto da cavidade e da camada de solo subjacente

Essas cavidades podem ter tamanhos variados, o que torna a “dimensão” do possível rebaixamento de difícil previsão, podendo resultar em desmoronamentos de camadas subjacentes e surgimento de cavidades superficiais de alguns metros de profundidade e de algumas dezenas de metros de diâmetro.

INDICATIVOS DE SUSCEPTIBILIDADE À SUBSIDÊNCIA

Considerando as demandas existentes e a disponibilidade dos recursos hídricos subterrâneos é necessário realizar a gestão adequada desses recursos para que a captação da água do aquíferos seja realizada de forma compatível com a capacidade de recuperação do mesmo. Caso contrário é necessário avaliar os riscos geotécnicos resultantes da exploração dessa área.

A exploração da água subterrânea pode ser considerada demasiada quando provoca danos ao meio ambiente ou para o próprio recurso, como aumento nos custos de bombeamento, escassez de água, indução de água contaminada e problemas geotécnicos de subsidência.

A estratégia de defesa dos mananciais subterrâneos consiste basicamente na delimitação da ocupação da área, baseada em mapas de graus de vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos e de riscos potenciais de poluição associados à carga contaminante presente na superfície, e no zoneamento de áreas de riscos potenciais, de áreas críticas que sirva de base ao planejamento para ações governamentais e de controle e proteção de aquíferos (Nadal et al., 2001 apud Foster et. al, 1988). No que se refere aos cuidados com a exploração desordenada dos recursos hídricos, considerando a gravidade dos riscos envolvidos na sua ocorrência, uma outra susceptibilidade que deve ser considerada refere-se à ocorrência de subsidência.

Para avaliação de riscos geotécnicos em áreas que apresentam potencial de rebaixamento superficial é necessária uma ação preventiva no sentido de evitar a ocupação inadequada do solo nessas áreas.

Baseado nas sugestões apresentadas por Nadal et al. (2001) sobre os passos para o levantamento de uma carta de risco de área urbanizada apresentase, a seguir, os critérios que podem ser considerados na avaliação da susceptibilidade de uma determinada área de desenvolver subsidência.

O processo preventivo pode ser baseado nos passos seguintes.

1. Levantamento e análise dos dados disponíveis com relação à topografia, geologia, mapas topográficos, geológicos, hidrológicos e uso e ocupação do solo. O objetivo principal desse levantamento é identificar ocorrências anteriores de movimentação do solo na área de investigação buscando associações com as características pluviométricas e a evolução do quadro de exploração local (quantidade de poços, dados de perfuração e regimes de operação).
2. Investigações específicas e orientadas de geologia e geomorfologia que denunciem a existência de carste coberto. Essas investigações devem permitir a identificação da natureza do carste e a localização espacial dos calcários na área. Alguns indicadores que devem ser considerados para um levantamento mais cuidadoso da região sobre a existência de um carste coberto são: drenagens secas, sumidouros, ressurgências, dolinas, entre outros.
3. Investigações diretas e indiretas para obter informações sobre os aquíferos: métodos elétricos de levantamento geofísico (método indireto), e sondagens ou de informações de poços existentes (método direto). O objetivo dessas investigações é identificar a presença de calcários com cavidades em subsuperfície, espessura e características do material de cobertura, identificação do perfil do solo local, com atenção especial à investigação sobre a presença e extensão de cavidades, natureza e comportamento da águas no subsolo.
4. Acompanhamento de evolução de cavidades próximas à superfície através de registros sismográficos, e de variações do nível piezométrico por meio de ensaios de bombeamento e instalação de piezômetros.
5. Determinação da velocidade de escoamento de água e do volume armazenado.
6. Acompanhamento das mudanças locais em frentes de topografia regular (surgimentos de depressões circulares, saliências e reentrâncias,...), tipo de vegetação (coloração e distribuição), estreitamento no leito dos cursos de água e nos vales.
7. Acompanhamento das mudanças locais no nível da superfície do solo, podendo ser in-

dicado, por exemplo, pelo surgimento de rachaduras em edificações, ou desnível em pavimentos.

8. Levantamento atualizado dos poços existentes e das vazões bombeadas

A Tabela 2 apresenta as atividades que devem ser conduzidas conforme o tipo de aquífero considerado, sedimentar ou cárstico.

Tabela 2 - Roteiro para levantamento de áreas de risco de subsidência

Atividades	Aquífero	
	Sedimentar	Cárstico
1) Levantamento e análise dos dados disponíveis.	X	X
2) Investigações específicas para identificação de carste coberto.		X
3) Investigações sobre os aquíferos (geometria, características hidrogeológicas).	X	X
4) Acompanhamento de evolução de cavidades.		X
5) Acompanhamento do escoamento de água e do volume escoado.		X
6) Acompanhar mudanças locais (topografia, vegetação, etc.).		X
7) Acompanhar mudanças em edificações locais.	X	
8) Levantamento atualizado dos poços existentes.	X	X

A realização das investigações sugeridas (itens 2 – 8) deve estar vinculada à necessidade de informações atualizadas, uma vez que as informações levantadas no item 1 já podem conter esses dados atuais. Além disso, é importante ressaltar que a realização de novas investigações não diminui a importância e a relevância em se considerar dados históricos. Essas informações são especialmente importantes quando se considera áreas urbanas onde se verifica uma variação muito grande no cenário local, como construção recente de obras hidráulicas (reservatórios, adutoras, rede de drenagem de águas pluviais, entre outras).

CASOS DE SUBSIDÊNCIA NO MUNDO

Vários centros urbanos contabilizam prejuízos devido à ocorrência de subsidiência. Existem registros de casos na literatura científica, em toda parte do mundo, relacionados com a exploração demasiada dos recursos hídricos subterrâneos em aquíferos sedimentares e cársticos, alguns estudos, inclusive, já vêm sendo realizados continuamente ao longo de algumas décadas. A partir desses estudos pode-se ter uma idéia da velocidade de evolução do processo e da gravidade das conseqüências quando não são tomadas medidas mitigadoras em tempo hábil.

O vale San Joaquin, localizado na Califórnia, compreende uma área de intensa atividade agrícola que chegou a apresentar subsidiência da ordem de 8,8 m ao longo de 50 anos de bombeamento (Larson et al., 2001). A área que tem sido objeto de estudo já há algum tempo e continua chamando a atenção de alguns pesquisadores oscila entre momentos muito críticos e outros “apenas” preocupantes. Ao final de 1970, por exemplo, a conclusão de um aqueduto reduziu o consumo da água subterrânea, ocorreu então uma redução de 50 a 70% da taxa de subsidiência e estudos recentes apontam para crescente redução nesta taxa nas últimas três décadas, entretanto períodos de seca, casos anteriores de subsidiência e vontades políticas conferem à região um alto grau de risco de novas ocorrências do fenômeno.

No Vale Las Vegas, Nevada, o processo que se iniciou em 1935 resultou em rebaixamentos do nível d'água superiores a 90 m e em subsidiência da ordem de 2 m (Bell, 1997). Sobre a subsidiência ocorrida no Vale Las Vegas, Hoffmann et al. (2001) realizaram um estudo em que compararam os deslocamentos medidos com extensômetros locados em vários partes e os resultados mostram concordância tanto na direção quanto na magnitude da subsidiência. Nesse contexto, os autores afirmaram que medições dessa natureza oferecem grande potencial para investigações futuras sobre o sistema aquífero e a heterogeneidade da estrutura do sistema e as propriedades do material, bem como para o monitoramento da compactação do sistema aquífero e da subsidiência. Localo (1997) apresentou dados de valores máximos de subsidiência, até 1997, para algumas localidades no sudoeste dos Estados Unidos, que variaram de menos de 30 cm em Tucson, Arizona, até 8,84 m no sudoeste de Mendota, na Califórnia.

Thu e Fredlund (2000) apresentaram vários exemplos de cidades e países expostos ao fenômeno

da subsidiência e destacaram a modelagem realizada em Hanoi, Vietnam. O processo de extração de água do aquífero se iniciou em 1909 e, atualmente, com uma população superior a 4 milhões de habitantes, utiliza uma demanda de aproximadamente 450000 m³/dia. Sérios problemas estruturais em edificações locais têm sido observados nos arredores dos poços bombeados como resultado do rebaixamento do solo nessas áreas. A região composta de solo compressível, a grande quantidade de água explotada e a variação horizontal e vertical do coeficiente de permeabilidade compõem características suficientes para justificar a taxa de subsidiência determinada no estudo, 20 a 35 mm/ano.

Na cidade de Suzhou, localizada na província de Jiangsu, na China verificou-se a ocorrência de rebaixamento do solo numa região que, segundo estudos hidrogeológicos e geológicos, há um sistema aquífero composto de várias camadas de argila de origens distintas (marinhas e lacustres), Chen et al. (2003).

A Tabela 3 mostra alguns casos de subsidiência registrados em várias localidades do mundo.

Em Taiwan, nos arredores do rio Choshui, o fenômeno de subsidiência do solo aumentou rapidamente ao longo de quatro décadas devido à grande exploração de água subterrânea (Liu et al., 2004). Foi realizado um monitoramento da compressão e foram identificadas as camadas com maior deformação, compostas de argila e areia, verificou-se, então, que as camadas de areia sofreram uma deformação volumétrica irrecuperável e exibiram um comportamento mecânico elastoplástico.

Ao relatar o estudo realizado no Condado de Yunlin, em Taiwan, Chang (2000) ressaltou a eficiência do emprego do GPS no monitoramento da subsidiência, uma vez que, além de rápida essa técnica não é cara e permite a obtenção de resultados com alta precisão. Com o objetivo de determinar o conjunto de dados da primeira época de medições e investigar a praticabilidade do monitoramento da subsidiência local com GPS foi instalada uma rede de monitoramento com 52 estações GPS.

Outros casos muito citados são os de Veneza, Bologna e Ravena na Itália (Bitelli et al., 2000; Carminati e Martinelli, 2002; Lewis e Schrefler, 1987) em que ocorreu subsidiência de 0,10m medida ao longo de 17 anos em Veneza e verificou-se uma taxa de subsidiência de 0 a 70mm/ano no Vale do Po; da Grécia (Stiros, 2001) em que observou-se uma taxa de subsidiência de 0,10m/ano; e da Holanda (Kooi, 2000; Van der Meij e Minnema, 1999) em que foi realizada uma modelagem aplicada à subsidiência.

Tabela 3 - Valores de subsidência registrados em vários países do mundo

Localidade	Tempo	Subsidência	Fonte
Vale San Joaquim, Califórnia	52 anos	8,8 m	Larson et al., 2001
Vale Las Vegas, Nevada	57 anos	2 m	Bell, 1997
Eloy, Arizona	-	4,57 m	Leake, 1997
Phoenix, Arizona	-	5,49 m	Leake, 1997
Vale Santa Clara, Califórnia	-	3,66 m	Leake, 1997
Cidade do México, México	100 anos	15 m	González-Morán et al., 1999
Hanoi, Vietnam	6 anos	0,30 m	Thu e Fredlund, 2000
Jakarta, Indonésia	-	0,20 m	Abidin et al., 2001
Suzhou, China	14 anos	1 m	Chen et al., 2003
Condado de Yunlin, Taiwan	-	0,10 m/ano	Chang, 2000
Ojiya, Japão	3 anos	0,07 m	Sato et al, 2003
Kerman, Irã	-	0,06 m/ano	Atapour e Aftabi, 2002

CASOS DE SUBSIDÊNCIA OCORRIDOS NO BRASIL

No Brasil existem poucos registros de subsidência devido à extração de fluidos, essa ausência de documentos, entretanto, não deve se traduzir em inexistência do fenômeno. Considerando que em algumas regiões do país a situação de exploração dos aquíferos já resultou em rebaixamentos muito grandes no nível d'água, faz-se necessário um monitoramento, nessas localidades, para detecção de possíveis deslocamentos verticais da superfície do solo.

Os aquíferos cársticos, por sua vez, quando sujeitos à subsidência são responsáveis por grandes catástrofes mundiais. No Brasil, os casos de maior repercussão foram os de Sete Lagoas em Minas Gerais, em 1988, o de Cajamar no estado de São Paulo, em 1986, e o de Mairinque, em São Paulo, em 1981. Os valores são impressionantes. Em Sete Lagoas foi aberta uma cratera de 20 m de diâmetro por 5 m de profundidade, em plena área urbana, e em Cajamar formou-se uma cratera de 31 metros de diâmetro

por 13 metros de profundidade. Em ambos os casos, as áreas são geologicamente caracterizadas pela ocorrência de rochas calcárias, assim sendo, os colapsos refletem, na superfície, a evolução ascendente dos bolsões, ou cavernas, do subsolo (Silva, 1995).

Um outro caso de subsidência ocorrido no Brasil aconteceu na cidade de Vila Tamandaré (Região Metropolitana de Curitiba). Nesta localidade a Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR está estudando a possibilidade de desativar os poços em operação na área urbana devido ao surgimento de buracos e dolinas que já vêm comprometendo algumas edificações no local. Segundo informações da Agência Estadual de Notícias do Paraná (2005), o município que tem cerca de 78% de sua área sobre o aquífero cárstico já sofre restrições quanto ao uso e ocupação do solo. Rattou et al. (1995, apud Nadal et al, 2001), atribuíram os problemas ocorridos em Almirante Tamandaré (PR), a uma exploração excessiva do aquífero, que provocou modificações no equilíbrio piezométrico do sistema, ocasionando o rápido rebaixamento do lençol freático livre. Esse rebaixamento provocou o adensamento da camada superficial, tendo como resultado os abatimentos do terreno com amplitudes de até 4cm.

Sobre os casos ocorridos no Brasil, Nadal et al. (2001) destacaram a semelhança entre as características hidrogeológicas dos locais onde ocorreram esses acidentes geotécnicos. Segundo os autores, todas as localidades citadas registram a presença de formações hidrogeológicas semi-permeáveis, separando a camada superficial permeável que constitui o aquífero livre e o aquífero cárstico semi-confinado estando os eventos de abatimento do terreno relacionados de certa forma, à exploração de água subterrânea.

Quanto à subsidência por bombeamento em aquíferos sedimentares no Brasil, não foi encontrada nenhuma referência, apesar de haver possibilidade de ocorrência em diversas cidades onde ocorre exploração excessiva de água subterrânea.

COMENTÁRIOS FINAIS

Algum tempo atrás a idéia de bombeamento sustentável de águas subterrâneas analisava apenas quanto poderia ser bombeado indefinidamente de um aquífero, no entanto o conceito atualizado de sustentabilidade do uso dos aquíferos requer que sejam levadas em conta as influências sobre os ecossistemas e o meio ambiente como um todo. A aplicação deste conceito atual de sustentabilidade deve

requerer que sejam considerados os riscos de subsidência.

A exploração intensiva de água subterrânea pode causar subsidência do solo tanto em regiões de geologia do tipo cárstico como em regiões de bacias sedimentares.

Em locais de formações de carste, o fluxo de água acarreta a dissolução dos compostos calcíferos, ocorrendo ampliação das cavidades de subsolo e conseqüente brusco abatimento do solo, com alguns metros de profundidade e algumas dezenas de metros de largura.

Em regiões de bacias sedimentares, o bombeamento excessivo reduz a pressão de suporte exercida pela água nos poros, conseqüentemente aumenta o esforço sobre os grãos de solo acarretando uma redistribuição dos grãos e a subsidência da superfície, que pode atingir alguns centímetros por ano numa extensão de vários quilômetros.

Apesar do amplo uso dos mananciais hídricos subterrâneos, existem poucos registros de subsidência devido à extração de fluidos no Brasil, essa ausência de documentos, entretanto, não deve se traduzir em inexistência do fenômeno. Considerando que em algumas regiões do país a situação de exploração dos aquíferos já resultou em rebaixamentos muito grandes no nível da água, faz-se necessário um monitoramento, nessas localidades, para detecção de possíveis deslocamentos verticais da superfície do solo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/CT-Petro pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa, e o segundo autor agradece ao CNPq/CT-Hidro pela bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS

- ABIDIN, H.Z., DJAJA, R., DARMAWAN, D., HADI, S., AKBAR, A., RAJIYOWIRYONO, H., SUDIBYO, Y., MEILANO, I., KASUMA, M.A., KAHAR, J., SUBARYA, C. (2001). *Land Subsidence of Jakarta (Indonesia) and its Geodetic Monitoring System*. Natural Hazards 23, p. 365-387.
- AGÊNCIA ESTADUAL DE NOTÍCIAS DO PARANÁ (2005). *Sanepar pode desativar poços de Almirante Tamandaré*. Texto (16/04/2005). Disponível em: <http://www.agencia.enoticias.pr.gov.br/modules/news/article.php?storyid=10941>
- ATAPOUR, H. & AFTABI, A. (2002). *Geomorphological, geochemical and geo-environmental aspects of karstification in the urban areas of Kerman city, southeast-ern, Iran*. Environmental Geology 42, p. 783-792
- BELL, J.W. (1997). *Las Vegas Valley: Land Subsidence and Fissuring Due to Ground-Water Withdrawal*. Nevada Bureau of Mines and Geology. Disponível em: http://geochange.er.usgs.gov/sw/impacts/hydrology/vegas_gw/
- BITELLI, G., BONSIGNORE, F., UNGUENDOLI, M. (2000). *Levelling and GPS networks to monitor ground subsidence in the Southern Po Valley*. Journal of Geodynamics 30, p. 355-369
- CABRAL, J.J.S.P. (2004). *Sustentabilidade de Aquíferos Costeiros*. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, Cuiabá.
- CARMINATI, E., MARTINELLI, G. (2002). *Subsidence rates in the Po Plain, northern Italy: the relative impact of natural and anthropogenic causation*. Engineering Geology 66, p. 241-255
- CHANG, C. (2000). *Estimation of Local Subsidence Using GPS and Levelling Combined Data*. Surveying and Land Information Systems, Vol. 60, N. 2, p. 85-94
- CHEN, C., PEI, S., JIAO, J.J. (2003). *Land subsidence caused by groundwater exploitation in Suzhou City, China*. Hydrogeology Journal 11, p. 275-287
- DEVLIN, J. F., SOPHOCLEOUS, M. (2004). *The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability*. Hydrogeology Journal, on line 28.05.004, Springer-Verlag
- FOSTER, S.D. S.; HIRATA, R.C.; ROCHA, G. A. (1988) *Riscos de Poluição de águas subterrâneas: uma proposta metodológica de avaliação regional*. 5o Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Anais. ABAS. São Paulo, Brasil, p. 175-185.
- GONZÁLEZ-MORÁN, T., RODRÍGUEZ, R., CORTES, S.A. (1999) *The Basin of Mexico and its Metropolitan Area: Water Abstraction and Related Environmental Problems*. Journal of South American Earth Sciences: 12, p. 607-613
- HOFFMANN, J., LEAKE, S.A., GALLOWAY, D.L., WILSON, A.M. (2003). *MODFLOW-2000 Ground-Water Model – User Guide to the Subsidence and Aquifer-System Compaction (SUB) Package*. U.S. Geological Survey Water-Resources Program Report 03-233, 44 p.
- KOOI, H. (2000). *Land Subsidence due to Compaction in the Coastal Area of The Netherlands: the Role of Lateral Fluid Flow and Constraints from Well-log Data*. Global and Planetary Change: 27, p. 207-222
- LAMONT-BLACK, J., YOUNGER, P.L., FORTH, R.A., COOPER, A.H., BONNIFACE, J.P. (2002). *A decision-logic framework for investigating subsidence prob-*

- lems potentially attributable to gypsum karstification. Em: Engineering Geology 65, pp.205-215
- LARSON, K.J., BASAGAOLU, H., MARIÑO, M.A. (2001) Prediction of optimal safe ground water yield and land subsidence in the Los Banos-Kettleman City area, California, using a calibrated numerical simulation model. Em: Journal of Hydrology, 242: 79-102
- LEAKE, S.A. (1997). *Land Subsidence from Ground-Water Pumping*. U.S. Geological Survey. Disponível em: <http://geocanger.usgs.gov/sw/changes/anthropogenic/subside/>
- LEWIS, R.W. & SCHREFLER, B.A. (1987). *Modelling of Subsidence*. The Finite Element Method in the Deformation and Consolidation of Porous Media. John Wiley & Sons, Chichester, p. 98-164
- LIU, C., PAN, Y., LIAO, J., HUANG, C., OUYANG, S. (2004). *Characterization of land subsidence in the Choshui River alluvial fan, Taiwan*. Environmental Geology 45, p.1154-1166
- MINGORANCE, F. (2000). *Manifestaciones de subsidencia superficial en el Pastal, Norte de Mendoza, Argentina*. Revista de la Facultad de Ingeniería, Argentina 41, p.5-16
- NADAL, C.A., GIUSTI, D.A., ROSA FILHO, E.F., HINDI, E.C. (2001). *Metodologia geodésica/geológica para o levantamento de deslocamentos do terreno em regiões circunvizinhas a um poço artesiano*. Anais do II Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Maio 2001.
- RATTON, E., NADAL, C.A., GIUSTI, D.A., JULIANO, K.A. (1995) *Um caso de subsidência no terreno devido à exploração de aquífero cárstico na Região Metropolitana de Curitiba*. Seminário Luso-Brasileiro de Geotecnia Ambiental. Lisboa, v.1.p. 15-25.
- SATO, H.P., ABE, K., OORAKI, O. (2003) *GPS-Measured Land Subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan*. Engineering Geology: 67, p. 379-390
- SCOTT, R.F. (1979). *Subsidence – A Review*. Evaluation and Prediction of Subsidence. ASCE, New York, p.1-25
- SILVA, A.B.(1995). *Capítulo 3.2 – Hidrogeologia de Meios Cársticos*. Curso de Hidrogeologia de Aquíferos Cársticos. Organizado pelo Núcleo de Estudos Hidrogeológicos do Meio Ambiente da UFBA(NEHMA), 39 p.
- STIROS, S.C. (2001). *Subsidence of the Thessaloniki (northern Greece) coastal plain, 1960-1999*. Engineering Geology: 61, p. 243-256
- TERZAGHI, K.T. (1925). *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*. Deuticke, Wien, 399 p.
- THU, T.M. E FREDLUND, D.G (2000). *Modelling subsidence in the Hanoi City area, Vietnam.. Canadian Geotechnical Journal*: 37, p.621-637
- VAN DER MEIJ, J.L., MINNEMA, B. (1999). *Modelling of the Effect of a Sea-Level Rise and Land Subsidence on the Evolution of the Groundwater Density in the Subsoil of the Northern Part of the Netherlands*. Journal of Hydrology: 226, p. 152-166

Intensive Groundwater Pumping And Soil Subsidence Risk

ABSTRACT

Soil subsidence is one of the problems that must be considered for aquifer sustainability, avoiding or mitigating damages in buildings, streets and pavements. Soil subsidence may be caused by fluid removal from pores or cavities below the soil surface. In urban areas, as well as at agricultural and industrial sites, excessive groundwater abstraction, at higher rates than recharge is the main cause of subsidence seen in several countries. Analyses of subsidence processes indicate the need for further research on this subject including both karst and sedimentary aquifers, to develop forecasting and simulation tools, monitoring strategies and mitigation techniques. Key-words: Soil subsidence, groundwater use, aquifer sustainability