

Conceptos básicos sobre o papel ambiental das águas subterrâneas e os efeitos da sua exploração

E. Custodio⁽¹⁾ y G. Cardoso da Silva Junior⁽²⁾

(1) Prof. Dep. Engenharia do Terreno. Universidade Politécnica de Catalunya. Gran Capità s/n. Mod. D2, 08034 Barcelona (Espanha) Tel.: +34.93.401.6920; Fax: +34.93.401.7251
e-mail: emilio.custodio@upc.edu

(2) Prof. Dep. Geologia, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ed. CCMN Bloco G Sala J0-05 21949-900 Rio de Janeiro (Brasil)
e-mail: gerson@acd.ufrj.br

RESUMO

A água subterrânea é uma parte essencial do ciclo hidrológico. Caracteriza-se pelo longo tempo de residência, ubiquidade e pequena variabilidade. As características e propriedades químicas e de fluxo têm de ser consideradas levando em conta a tridimensionalidade do sistema. O fluxo estável e as propriedades químicas pouco variáveis têm um papel fundamental nos processos geológicos e biológicos e conseqüentemente têm importantes implicações ambientais, como na manutenção de vazões de base de rios e mananciais, pântanos, comunidades de plantas freatófitas e matas de galeria. Também é essencial o seu aproveitamento para satisfazer necessidades humanas. A extração da água subterrânea implica uma mudança no padrão de fluxo, que pode resultar em um rebaixamento do lençol freático e dos níveis piezométricos, decréscimo da descarga de água e mudanças na composição química, além de subsidências do terreno em alguns casos. Tudo isso modifica as condições ambientais, levando ao decréscimo das vazões, redução da superfície coberta por plantas freatófitas, ressecamento de áreas úmidas e modificações biológicas relacionadas às mudanças químicas. Essas modificações, porém, aparecem com um grande atraso e a um ritmo muito lento. Nem sempre as relações de causa-efeito são evidentes. Os impactos negativos têm que ser comparados aos benefícios sociais advindos da exploração e também com os impactos de outras alternativas. Isso inclui levar em conta uma possível remediação dos efeitos negativos diferidos e seus custos. A salinização e contaminação de aquíferos é um importante assunto que tem que ser considerado, já que a água subterrânea cedo ou tarde entrará em contato com o meio ambiente, levando consigo os contaminantes.

Palavras-chave: águas subterrâneas, exploração, interferências, meio ambiente

Basic concepts on the environmental role of groundwater and the effects of its development

ABSTRACT

Groundwater is an essential part of the hydrological cycle. It is characterized by the long residence time, ubiquity and small variability. Chemical, flow characteristics and properties have to be considered taking into account the three-dimensional behavior of the system. The stable flow and small variability of chemical properties have a fundamental role in geological and biological processes and, as a consequence, they have important environmental implications, such as sustaining river and spring base flow, wetlands, phreatophyte plant communities, gallery forests, ..., and also they are essential to satisfy human needs. The use of groundwater implies changing the flow pattern, which may result in water-table and piezometric level drawdown, decrease of water discharge, and chemical composition changes, besides subsidence in some cases. All this modify the environmental conditions, leading to flow decrease, phreatophyte plant surface area, drying of wetlands and biological modifications related to chemical changes. However, these modifications may appear long-delayed and at a very slow pace. Even the case-effect relationships may not be easily seen. Negative impacts have to be compared to social benefits from development and also to the impacts of other alternatives. This includes taking into account the possible remediation of negative delayed effects and their costs. Aquifer salinization and contamination is an important issue to be taken into account, since groundwater will soon or later contact the environment taking with it the contaminants.

Key words: environment, exploitation, groundwater, interferences

Introdução

A água subterrânea é uma parte essencial do ciclo hidrológico que tem um importante papel nas caracte-

rísticas do meio ambiente e na conservação da biodiversidade (Ragone *et al.*, 2007; Custodio, 2001, 2005a). Estes aspectos são freqüentemente esquecidos quando se planeja o desenvolvimento das águas

subterrâneas num área. Normalmente só os custos diretos são considerados, deixando de lado os custos indiretos ou externalidades, que passam a ser suportados pela comunidade que não recebe os benefícios da exploração, quer sejam a presente ou as futuras gerações.

Até umas poucas décadas atrás, a exploração global das águas subterrâneas era uma parte pequena do fluxo natural, mesmo em áreas áridas e semiáridas. Porém, a introdução da bomba submersa, a facilidade para perfurar poços e o relativo baixo custo da energia levou a uma mudança total do panorama, principalmente em áreas áridas e semiáridas, produzindo-se uma exploração intensiva dos aquíferos (Llamas e Custodio, 2003), o que comporta uma importante modificação dos sistemas naturais de fluxo, e a situações complexas e mesmo preocupantes, que na literatura comum se qualifica como sobre-exploração (Margat 1992; Collin e Margat, 1993; Hernández-Mora *et al.*, 2001; Custodio, 2002). Isto leva a situações técnicas, administrativas, legais, econômicas e sociais que são novas, e para as quais falta experiência. As instituições de gerenciamento das águas devem ser profundamente modificadas e reforçadas, com um novo espectro de profissionais, além de integrar os numerosíssimos usuários das águas subterrâneas em associações representativas ou comunidades com conhecimento, participação e corresponsabilidade.

O objetivo deste artigo é contribuir à difusão de conceitos gerais, conhecidos pelos especialistas em águas subterrâneas, mas até agora não suficientemente introduzidos no domínio do ensino de grau primário e secundário, e das pessoas que na vida real gerenciam as águas e tomam as decisões. Na bibliografia encontram-se referências de interesse para reforçar idéias básicas, de forma simples (Candela *et al.*, 1998, López Geta *et al.* 2001), de forma um pouco mais elaborada (Price, 2002; Younger, 2007) ou de forma mais completa (Custodio e Llamas, 1976, 1983). Nesses textos, e em muitos outros, podem-se encontrar as definições dos termos empregados. A consideração das áreas costeiras pode ademais encontrar-se em Custodio e Bruggeman (1986), Custodio (2005b), e a das pequenas ilhas em Falkland e Custodio (1991). A água subterrânea nos países áridos e semiáridos é principalmente utilizada para a irrigação agrícola, que constitui em países em vias de desenvolvimento um fator econômico básico (Llamas e Martínez Cortina, 2002; Garrido *et al.*, 2006; Giordano e Villholth, 2007) e também de subsistência rural (Shah, 2005), e a chave para tratar de lograr, na temática da água, os objetivos da Declaração do Milênio das Nações Unidas.

Aspectos básicos essenciais da água subterrânea

A água subterrânea é a água que ocorre nos poros, fissuras e vazios sob a superfície do terreno, tanto na zona não saturada quanto na zona saturada subjacente. Frequentemente, a designação "água subterrânea" refere-se à água situada na zona saturada. A água combinada com minerais ou a que ocorre em pequenos poros não conectados em rochas de textura fina frequentemente não é considerada propriamente água subterrânea, embora possa ter um importante papel nos processos hidrogeológicos.

Um sistema aquífero corresponde a um conjunto de aquíferos (permeabilidade suficiente para que a água seja extraível) e aquíferos (baixa permeabilidade que não permite a mobilização significativa), formando uma unidade hidrogeológica, o que inclui tanto as camadas livres como confinadas. Uma mesma camada ou formação pode ser livre, confinada ou semi-confinada, dependendo da posição e do padrão de cargas hidráulicas. A carga hidráulica pode diferir de uma unidade a outra, e a água subterrânea flui segundo um padrão 3-D (tridimensional). A água subterrânea flui com um componente dominante horizontal em aquíferos, mas se move verticalmente através dos aquíferos que separam aquíferos. O movimento é predominantemente vertical descendente na zona não saturada, exceto quando muito próximo à superfície do terreno, onde as forças de evaporação e a sucção das raízes das plantas podem produzir um movimento ascendente entre eventos chuvosos.

A recarga dos aquíferos ocorre por infiltração da chuva numa grande porção da superfície terrestre (Lerner *et al.*, 1990; Custodio *et al.*, 1997; Alcalá e Custodio 2007). A recarga também ocorre em faixas de terreno ao longo de riachos, rios de montanha, limites de coberturas de neve em processo de derretimento, pés-de-monte, orla de lagos, etc. sob condições favoráveis de carga hidráulica.

A água subterrânea pode fluir até vários quilômetros de profundidade em condições hidrogeológicas favoráveis, embora a maior parte mova-se nas primeiras centenas de metros. O movimento muito lento da água implica que o volume de reservas de água subterrânea (volume de água total no subsolo) seja várias vezes maior que a água que flui anualmente no sistema, justamente o contrário do que ocorre nos rios. Essa é uma diferença fundamental entre águas superficiais e subterrâneas, que tem de ser levada em consideração quando se analisa o papel ambiental e o uso das águas subterrâneas. Ambas são parte do mesmo ciclo hidrológico e são inicialmente conectadas, mas se comportam de forma bem diferente.

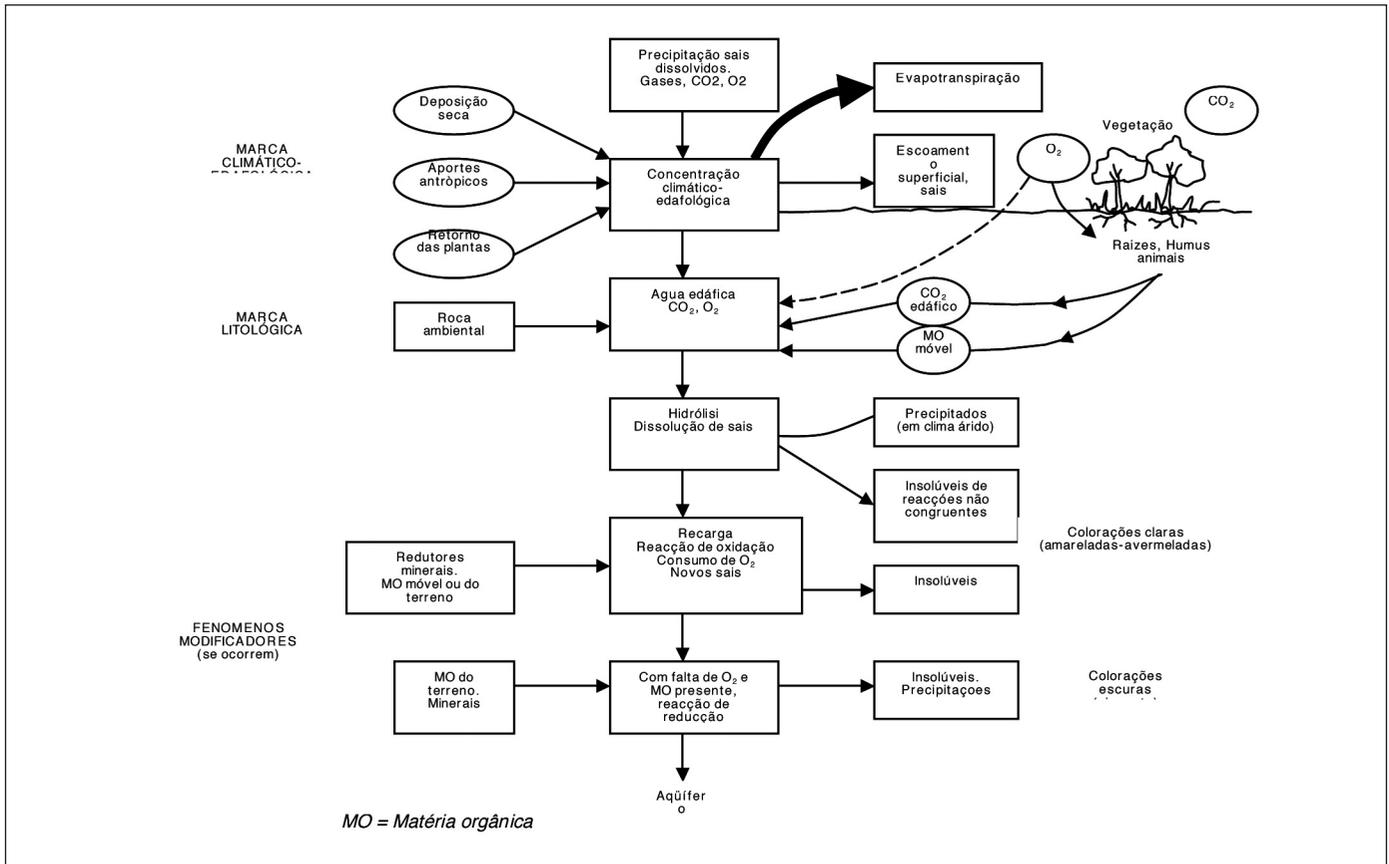


Fig. 1. Representação simplificada e idealizada de como a composição química da água subterrânea é gerada. A figura refere-se à recarga difusa por precipitação (modificado de Candela *et al.*, 1998)

Fig. 1. Simplified and idealized chart showing how the chemical composition of groundwater is acquired. The figure refers to diffuse recharge by precipitation (modified from Candela *et al.*, 1998)

A composição química das águas subterrâneas de circulação relativamente rápida é o resultado de processos que ocorrem principalmente no solo (fig. 1). A água da chuva é evapotranspirada e os sais e matéria transportados pelo ar e dissolvidos na água da chuva são concentradas por evaporação (evapoconcentração), ao mesmo tempo em que incorpora-se o CO₂ resultante da respiração dos seres vivos e degradação da matéria orgânica. Isso tem como consequência a hidrólise de alguns minerais (carbonatos, silicatos). Como resultado, cátions oriundos dos solos e rochas são adicionados à água e o CO₂ transforma-se majoritariamente em HCO₃⁻. Sob condições oxidantes, a matéria orgânica transforma-se em CO₂, os compostos de enxofre e nitrogênio a SO₄²⁻ e NO₃⁻, e a maioria dos metais pesados permanece sob forma sólida, como óxidos e oxihidróxidos de altas valências, que são quase insolúveis. Se o O₂ dissolvido no ar e também o NO₃⁻ (resultante do apodrecimento das plantas ou adicionado artificialmente) são depletados

por matéria orgânica ou outros doadores de elétrons, as condições inicialmente oxidantes passam a reductoras e alguns metais pesados podem dissolver-se como íons reduzidos (Fe²⁺, Mn²⁺), e o sulfato pode-se reduzir a bissulfeto (HS⁻). Sob intensa condição redutora pode formar-se o gás metano. A capacidade de troca catiônica de minerais, principalmente minerais de argila e matéria orgânica, tem um papel significativo em retardar e suavizar as mudanças químicas, principalmente as relacionadas à cátions. Um papel similar tem a capacidade de adsorção de superfícies de minerais, matéria orgânica e colóides com respeito à matéria orgânica dissolvida e alguns ânions.

Em todos esses processos, o cloreto comporta-se como um íon conservativo (não interage) e na maioria dos casos comporta-se como um importante traçador ambiental na identificação da recarga e do fluxo. O cloreto caracteriza principalmente a concentração por evaporação (evapoconcentração), visto que não é volátil. A evapoconcentração pode ser

pequena em climas úmidos (uma taxa de precipitação por recarga não muito maior que 1) mas muito grande em áreas áridas, o que pode significar uma taxa de até 100 ou mesmo maior. Isso significa que a água de recarga pode chegar a ser salobra nessas circunstâncias (Custodio *et al.*, 1997).

Porém, em aquíferos com longo tempo de renovação a situação pode ser diferente, pois águas marinhas antigas relictas, água salina e salmouras por intensa evaporação, sais evaporíticos e águas de camadas profundas podem estar ainda nesses aquíferos ou penetrando através de aquíferos com drenança. Isso explica as nascentes e riachos salgados.

Em áreas vulcanicamente ativas pode ocorrer um aporte de solutos e principalmente de CO₂ profundos que podem modificar grandemente a composição química da água subterrânea e a sua reatividade.

Papel da água subterrânea no meio ambiente

O papel da água subterrânea no meio ambiente apresenta diferentes aspectos mas todos têm como característica as relativamente pequenas mudanças na descarga do fluxo e nas características químicas quando comparadas à marcadas variações climáticas sazonais e interanuais, em contraste ao que ocorre com a grande variabilidade das águas superficiais. Esse fato produz condições ambientais que favorecem a ocorrência de condições estacionárias no primeiro caso e de variabilidade no segundo. A combinação leva a uma grande diversidade de situações ambientais, tanto no espaço como ecologicamente, o que favorece a diversidade.

Alguns dos papéis da água subterrânea no meio ambiente são:

- Descargas de água subterrânea permanentes ou de pequena variação em nascentes ou ao longo de rios, o que mantém a vazão de base. Isto permite que haja disponibilidade de água o ano todo, mesmo quando a contribuição de superfície anula-se.
- Áreas de descarga permanente ou de pequena variação (áreas úmidas), tanto com águas profundas (lagos) ou rasas (brejos, pântanos).
- Níveis freáticos estáveis e pouco profundos, acessíveis a plantas perenes ao longo de fundos de vale (matas de galeria), ao redor de lagos e outros lugares.
- Sustentabilidade do conteúdo salino de lagos e áreas úmidas localizadas em bacias endorreicas onde existe uma descarga de água subterrânea que mantém o balanço de sais dissolvidos.
- Manutenção das características físico-químicas da

água e de condições para sustentar algumas espécies de vegetação e animais associados. Essas características são o pH, o suprimento de bicarbonato, sílica, concentração de sílica, que podem ser bastante particulares e portanto são essenciais para a manutenção de espécies especializadas.

- Fornecimento de sais a zonas úmidas salinas e depósitos de sal, para a manutenção de ambientes especiais.

Efeitos hidrodinâmicos e químicos derivados da utilização de águas subterrâneas

A exploração de águas subterrâneas para usos econômicos (água para beber, para suprimento doméstico e municipal, agricultura, indústria, turismo e jardinagem/paisagismo) implica na modificação do padrão de fluxo de modo a direcionar a água para as obras de captação (poços tubulares, cacimbas, drenos e galerias) com a diminuição do nível d'água e dos níveis piezométricos. A água extraída é uma água agora não mais disponível para as áreas de descarga natural. Conseqüentemente, os efeitos da utilização de águas subterrâneas são (Custodio, 1991; 1996; Margat, 1992; Llamas e Custodio, 2003; Sahuquillo *et al.*, 2005):

- Diminuição da carga hidráulica e rebaixamento do lençol freático.
- Redução das descargas naturais.
- Modificações no padrão de fluxo que afetam a distribuição da qualidade da água no subsolo e o deslocamento de águas salinas, incluídas as águas marinhas intrudidas.

Mas as extrações e seus efeitos não são simultâneos. Também as mudanças na carga hidráulica podem modificar a recarga do sistema aquífero, freqüentemente incrementando-a. Isso significa que não existe uma relação de causa-efeito direta, simples. Deve-se esse fato à alta taxa de armazenamento da água com relação ao fluxo, à pequena difusividade hidráulica (razão da permeabilidade pelo armazenamento específico) e à menor ainda velocidade de transporte dos solutos. A experiência humana com a água superficial, a qual é facilmente observável e cujo comportamento é mensurável a um passo diário em termos de escala de tempo, não é transferível à água subterrânea, que se comporta em três dimensões, em uma superfície muito maior, despercebida por leigos e a uma escala de tempo comparável ou maior do que a duração da vida humana, ao invés da experiência do dia-a-dia (ver quadro 1).

Os efeitos benéficos da utilização da água subterrânea são bem conhecidos, conforme apresentado no

<p>§ <i>Grande armazenamento</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Pequena variabilidade da descarga natural, qualidade e temperatura • Possibilidade de adaptar a extração à demanda • Adequada para abastecimento sob picos de demanda, secas e emergências • Sem necessidade de armazenamento de água • Armazenamento essencial em áreas costeiras
<p>§ <i>Fluxo muito lento em pequenos vazios em 3-dimensões</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mistura de linhas de fluxo na captação, homogeneização • Tempo para: <ul style="list-style-type: none"> – Progressão de reações químicas – Decaimento biológico de organismos patogênicos – Decaimento de isótopos de período curto/médio – Equalização de temperatura – Correção de incidentes de contaminação ⇒ depuração no terreno • Efeito de filtragem ⇒ água límpida
<p>§ <i>Grande extensão areal</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade próxima à demanda de água • Investimento mais baixo por menor transporte • Menos problemas de uso da terra ⇒ a obra de captação ocupa pouco espaço
<p>§ <i>Hidrológicos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Avaliação mais rápida • O conhecimento do sistema cresce com o desenvolvimento • Cenários futuros confiáveis
<p>§ <i>Outros</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Maior segurança contra: riscos naturais, falhas humanas, ações criminosas • Possibilidade de suprimento direto seguro como água para beber

Quadro 1. Vantagens do uso da água subterrânea. Conseqüências positivas do uso dos aquíferos
Table 1. Advantages of the use of the groundwater. Positive consequences of the use of the aquifers

quadro 1. Mas os benefícios não ocorrem sem efeitos negativos sobre o meio ambiente e sobre a sustentabilidade e economia da própria solução, como ocorre com qualquer intervenção artificial em processos naturais. O quadro 2 mostra um sumário dos efeitos negativos. Uma parte desses efeitos negativos deve-se ao comportamento hidrodinâmico dos sistemas aquíferos e pode por isso ser facilmente internalizada e corrigida, devendo tomar parte em qualquer avaliação de alternativas de uso de águas subterrâneas; caso contrário trata-se de um caso de ignorância e técnica não apropriada, não um real problema negativo. Outros efeitos negativos são mais difíceis de prever e avaliar, e portanto de internalizá-los, tais como subsidências devido ao bombeamento de água, mudanças na qualidade da água e impactos ambientais. Porém, a larga experiência já adquirida na utilização da água subterrânea, o bom entendimento dos processos básicos e as poderosas ferramentas de estudo atualmente de uso corrente, representadas pelos modelos numéricos de fluxo e

transporte, podem diminuir muito as incertezas quanto ao comportamento futuro, porém sempre subsistirão as incertezas inerentes a todo processo natural.

Considerando-se que a preservação da natureza não é uma moda, mas uma necessidade (Ramos, 1993) e um valor ético a ser considerado juntamente com as necessidades sociais (Pérez Adán, 1992), em contraposição ao comportamento especulativo, irracional e de visão curta, como comentam Foster (1991) e Custodio (1996), os efeitos negativos antes referidos devem ser levados em conta. Os benefícios do desenvolvimento dos recursos naturais devem ser maiores que os danos produzidos tanto no curto e no longo prazo, depois da introdução de medidas corretivas e do estabelecimento de limitações ao uso do recurso. Se não são considerados os custos indiretos (externalidades), estes serão passados à sociedade atual e futura. Os métodos de estudo atuais permitem uma definição razoável de medidas corretivas confiáveis. A preservação de zonas úmidas é uma importante restrição no gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos (Llamas, 1988, 1992), a qual não impede o desenvolvimento, mas que demanda uma abordagem ampla e racional.

<p>§ <i>Efeitos no volume de recursos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Rebaixamento do nível freático <ul style="list-style-type: none"> – Custo de extração crescente – Substituição de poços, bombas e instalações • Decréscimo das vazões em nascentes, nível de base dos rios e superfície de zonas úmidas • Maiores comprimentos onde o rio perde água Estes efeitos implicam fluxos transientes de longa duração (meses a milênios) em aquíferos/sistemas aquíferos grandes e pouco permeáveis Os efeitos podem ser facilmente internalizados
<p>§ <i>Efeitos na qualidade da água</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Mudanças na qualidade quando o padrão de fluxo se modifica <ul style="list-style-type: none"> – movimentação de corpos de água com má qualidade – intrusão de água do mar em aquíferos costeiros – infiltração mais fácil de águas superficiais • Mescla de águas de diferentes qualidades em poços e furos de sondagem <ul style="list-style-type: none"> – mudanças na qualidade química da água com a vazão/tempo – a água superficial e de aquíferos rasos pode penetrar em aquíferos profundos
<p>§ <i>Outros efeitos</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • Subsídências • Crescentes taxas de colapso <ul style="list-style-type: none"> – em áreas de karst – devido a poços mal construídos

Quadro 2. Desvantagens do uso da água subterrânea. Conseqüências negativas do uso dos aquíferos
Table 2. Disadvantages of the use of the groundwater. Positive consequences of the use of the aquifers

Efeitos ambientais devidos ao rebaixamento do nível freático

Diminuição das descargas

As mais importantes modificações ambientais produzidas pela utilização de águas subterrâneas são:

- Diminuição das vazões de rios e nascentes,
- Ressecamento de lagos e áreas úmidas,
- *Stress* hídrico e desaparecimento de espécies freatófitas em áreas úmidas e matas de galeria,
- Mudanças dos alagamentos, no regime de cheias e frequência dos déficits hídricos no solo.

Essas modificações resultam do que foi apresentado anteriormente sobre as propriedades dos sistemas aquíferos (ver também Custodio, 1995). O efeito sobre comunidades de freatófitas resulta diretamente do rebaixamento no lençol freático após a utilização da água subterrânea. Esse efeito aparece quando o nível freático é mantido em uma posição mais baixa que a máxima profundidade das raízes, a qual depende de características das plantas e da espessura do solo e rocha alterada. Igualmente, a taxa de rebaixamento do nível d'água (ou da franja capilar) tem que ser considerada juntamente com a habilidade das plantas em estender suas raízes em profundidade. Porém, as situações reais freqüentemente são complexas e de difícil interpretação (fig. 2), e precisam de um modelo conceptual apropriado (fig. 3). O que realmente interessa desde um ponto de vista ecológico é o comportamento do lençol freático. Porém, em muitos casos o desenvolvimento dos recursos hídricos subterrâneos realiza-se em camadas mais profundas (fig. 4). Dependendo das circunstâncias hidrogeológicas locais, o efeito sobre o lençol freático pode ser pequeno ou lento e com grande retardo, ou o rebaixamento produz-se em locais distantes, onde as camadas confinadas do aquífero profundo começam a aflorar.

Em casos nos quais a exploração de água subterrânea ocorre a partir de camadas profundas mais permeáveis (aquíferos) como conseqüência da utilização da água subterrânea, o rebaixamento inicial é pequeno e pode passar despercebido por algum tempo. Isto é devido à variabilidade natural produzida por mudanças na recarga pela chuva, que mascara a tendência ao rebaixamento. Também se deve ter em conta que, em áreas agrícolas, quando chove as bombas dos poços param. O resultado é que depois períodos úmidos aparentemente há uma recuperação total dos níveis antigos de águas altas, como em Doñana (fig. 5).

Contudo, ocorre que o resultado real, do ponto de vista das freatófitas, é que as situações de umidade

ficam mais curtas e menos freqüentes, e os períodos secos de *stress* hídrico tornam-se mais longos e mais freqüentes. Isso resulta em que as plantas mais sensíveis não se desenvolvem, definham ou sofrem de *stress* hídrico e doenças, e sua área diminui de tamanho ou desaparece. Esse cenário é uma marcha em direção à desertificação, e mimetiza uma mudança climática evoluindo a situações mais secas e irregulares.

Muitos desses efeitos foram extensivamente documentados na área de Doñana, no Sul da Espanha (Suso e Llamas, 1991; Custodio e Palancar, 1995; Llamas, 1990; Trick, 1998). Outra área com impactos documentados é a das Tablas de Daimiel, em La Mancha, Espanha Central (Llamas, 1988; López-Camacho e García Jiménez, 1991).

Subsidências e colapsos

As subsidências devidas à utilização de águas subterrâneas ocorrem em sedimentos relativamente jovens, inconsolidados, quando a redução da pressão de água intersticial (ou óleo ou gás), com o conseqüente aumento da tensão intergranular, produz uma redução não elástica e não reversível da porosidade por compactação. Como conseqüência, a superfície do terreno sofre subsidência. O efeito é muito pequeno por unidade de espessura do pacote sedimentar, mas em muitas bacias sedimentares e áreas costeiras a espessura afetada é de centenas ou mesmo milhares de metros. Isso leva a subsidências na superfície de decímetros a vários metros em grandes áreas, como acontece na Califórnia, Golfo do México, Bancoque, Tóquio, Cidade do México, Veneza e outras áreas. O principal resultado são mudanças nas características de inundação na área, que agora está mais suscetível a ser alagada e pode mesmo tornar-se endorreica se não for artificialmente drenada. Esse fato tem um efeito no meio ambiente e nas comunidades de vegetais. Quando o lençol freático não é afetado pela exploração de água subterrânea de aquíferos profundos e bem confinados, não só o nível d'água sobe devido à subsidência como pelo aumento na recarga. Isso pode dar origem a lagos e pântanos alimentados pela água subterrânea se a zona não for drenada pelo homem. A drenagem aqui refere-se ao aprofundamento de vales e escavação de canais, que podem produzir um descenso do nível freático fora da zona sujeita à subsidência. Em áreas costeiras não só as inundações são mais fáceis de ocorrer, como a linha de costa pode retroceder (como no delta do Llobregat, Barcelona), sendo as terras baixas e planas invadidas pelo mar, ficando mais sujeitas a ser inundadas durante ressacas.

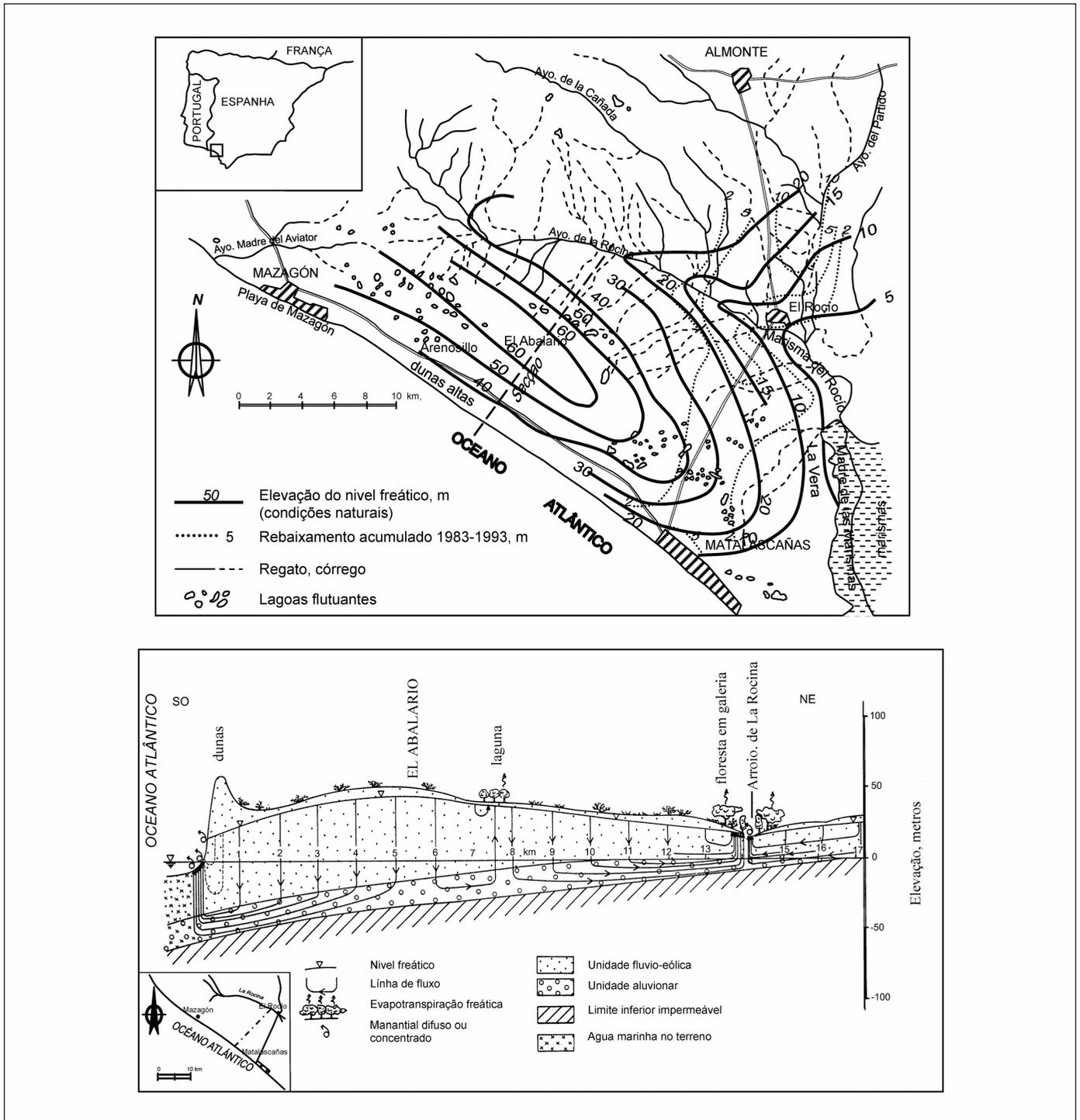


Fig. 2. Padrão de fluxo tridimensional de águas subterrâneas idealizado em uma seção através da formação arenosa de El Abalarío (Doñana, Sul da Espanha) onde um aquífero profundo ocorre sob uma potente camada de areias siliciclásticas finas a médias e que contém o aquífero livre. A água subterrânea fluindo através das areias é descarregada em fontes e como fluxo difuso na linha de costa e no riacho La Rocina, bem como pelas plantas próximo a La Rocina e em áreas intermediárias de aquíferos freáticos rasos. A presença de formações de baixa permeabilidade tem grande influência no padrão de fluxo local (modificado de Custodio e Palancar, 1995; Custodio, 1995)

Fig. 2. Idealized three-dimensional flow pattern in a cross-section through the El Abalarío sandy formation (Doñana, southern Spain) where a deep aquifer underlies a thick layer of fine to medium silica sands containing the water-table. Groundwater flowing through the sands outflows in springs and as diffuse flow at the coast line and at the La Rocina ravine, as well as through the plants near La Rocina and in intermediate areas with shallow water-table. The existence of low permeability formations has a great influence in the local flow pattern (modified from Custodio and Palancar 1995; Custodio 1995)

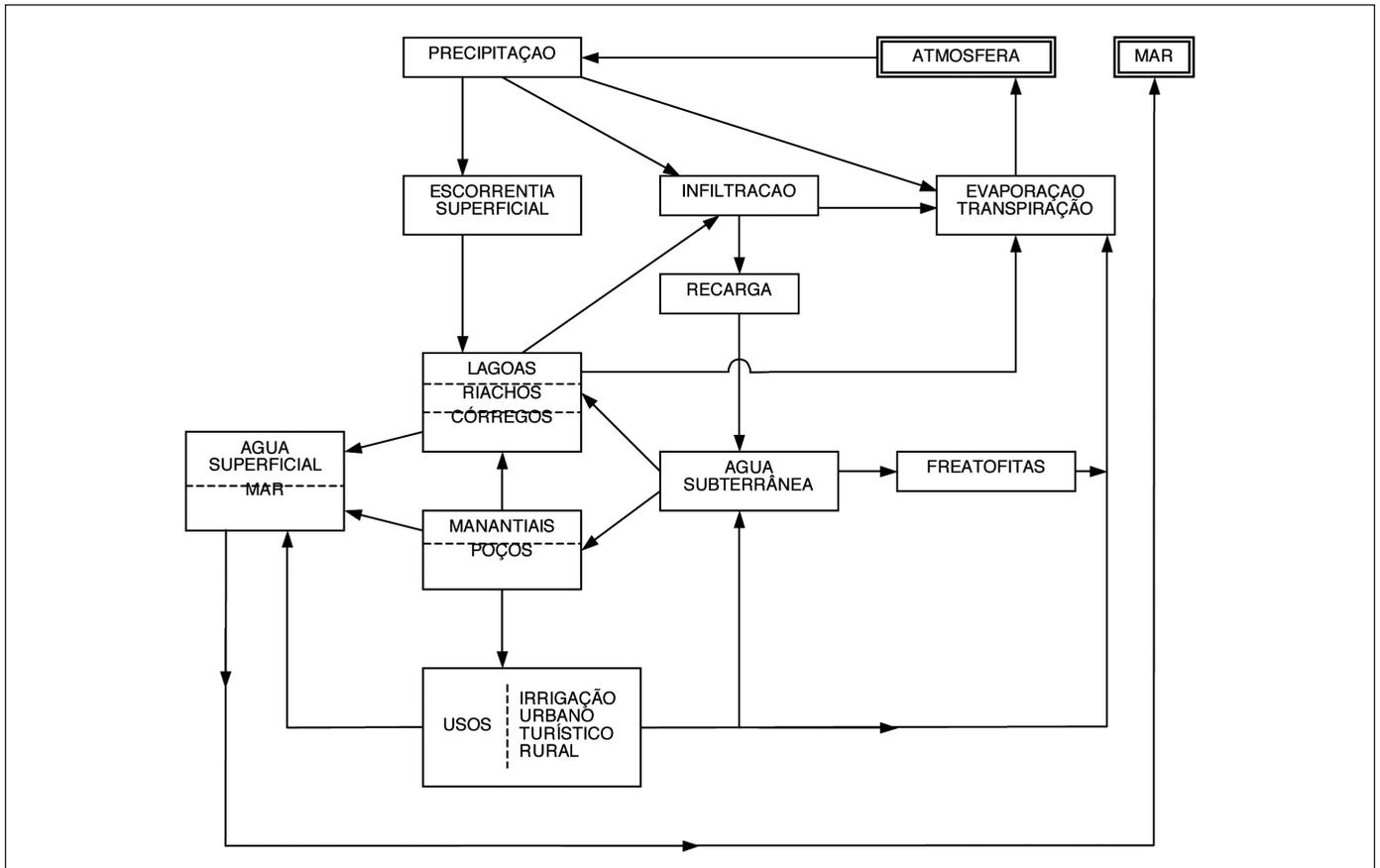


Fig. 3. Diagrama esquemático dos elementos do balanço de água na área de Doñana (Sul de Espanha). Estes diagramas são um resumo do modelo conceitual

Fig. 3. Schematic chart of water balance elements in the Doñana area (southern Spain). These charts are a summary of the conceptual model

Se a espessura do sedimento e suas características são homogêneas, a subsidência não produz modificações relativas conspícuas na topografia, mas a subsidência diferencial pode ocorrer em caso contrário. Esse fato leva ao colapso de casas e edifícios, como no perímetro dos depósitos lacustres da Cidade do México (muito evidente nas fraturas e piso desigual da velha Catedral, enquanto o velho Teatro afundou por igual), ou ruptura do pavimento de rodovias, estradas de ferro, tubulações e canais.

A subsidência não aparece em rocha dura, maciça, porém, mudanças na pressão de água subterrânea podem afetar as propriedades sísmicas da área de um modo ainda pobremente entendido atualmente. Os efeitos da extração de água subterrânea são mais importantes em rochas duras suscetíveis à dissolução pela água subterrânea (karstificação), tais como as rochas carbonatadas (calcários e em menor medida dolomitos) e gessos. Cavidades em baixa profundidade podem incrementar a suscetibilidade a colap-

so (formação de simas quando a carga hidráulica dentro dessas estruturas reduz-se ou estes perdem água devido a bombeamento) e também quando flutuações artificiais do nível d'água ocorrem e as mudanças de pressão do ar induzidas enfraquecem a estrutura.

Efeitos da recuperação do nível freático

As extrações de água subterrânea podem não ser permanentes. Isso pode ocorrer após uma nova fonte de água ser disponibilizada na área, ou pela queda da qualidade da água extraída (fluxo de retorno de irrigação, contaminação, intrusão de água salgada), mudança do uso corrente do solo ou qualquer outra causa (Custodio, 1997).

Como consequência, o maior efeito durante a utilização de águas subterrâneas, que corresponde ao rebaixamento do lençol freático, começa a sua recu-

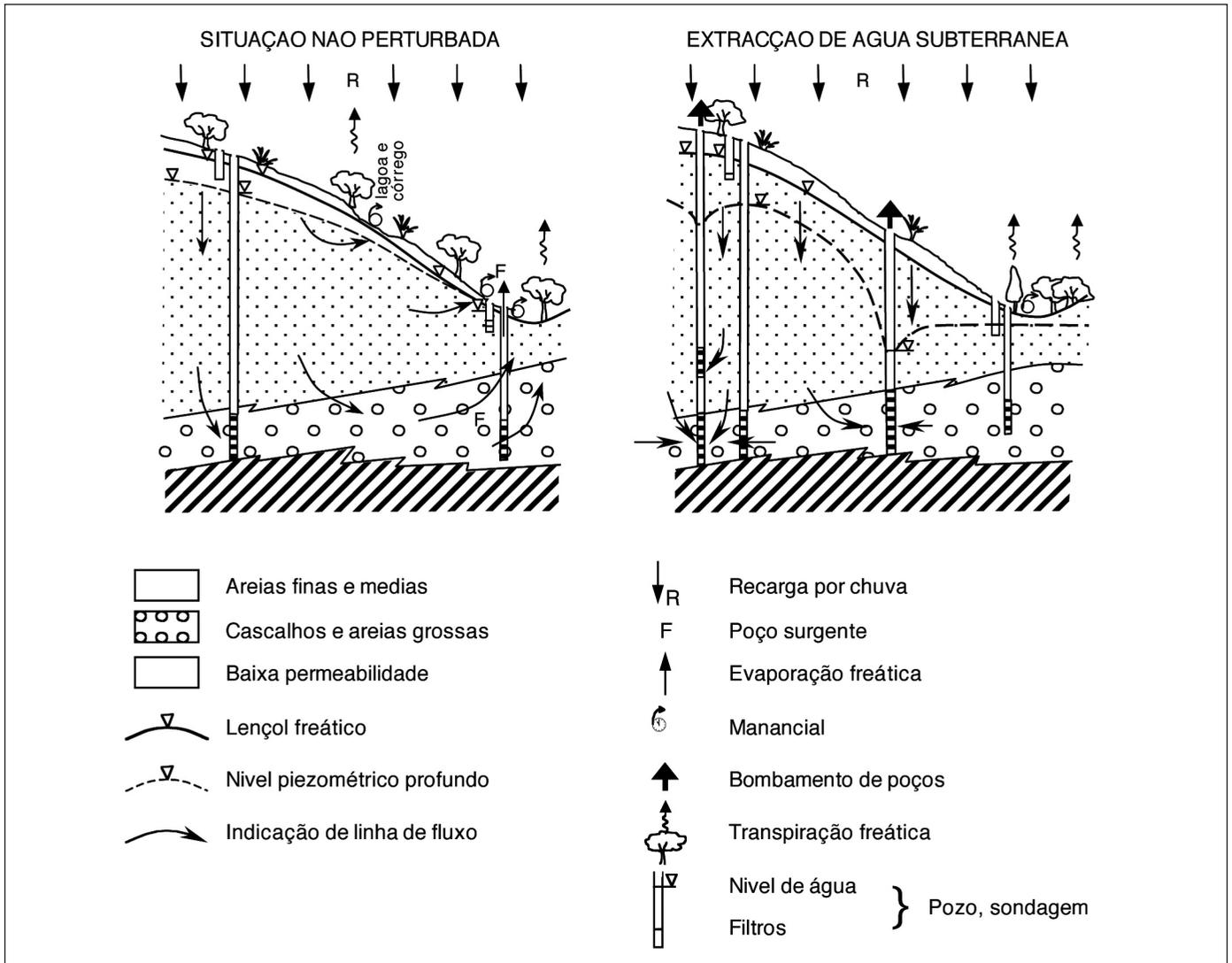


Fig. 4. Esquema idealizado das relações entre o nível freático e o nível piezométrico profundo no sistema aquífero de El Abalarío, área de Doñana (Sul de Espanha) de areias finas sobre uma formação profunda grosseira onde estão os filtros dos poços. Situações natural e perturbada por bombeamentos. Põe-se atenção nos efeitos ambientais (mananciais, riacho, lagoas e vegetação)

Fig. 4. Idealized depiction of relationships between water-table and deep piezometric level in the aquifer system of El Abalarío, Doñana area (southern Spain), consisting on fine sands overlaying a coarse deep formation where the well's screens are placed. Natural and disturbed situation by pumping. The figure call the attention on environmental effects (springs, ravine, lagoons and vegetation) (modified from Custodio and Palancar 1995)

peração procurando restabelecer a cota natural anterior ao bombeamento, ou uma nova posição controlada pelas obras de drenagem existentes. Essa recuperação tem um claro efeito ambiental, já que áreas antigamente correspondentes a aquíferos freáticos rasos e zonas úmidas podem reaparecer, mas agora com infra-estruturas presentes sobre o território. Estas freqüentemente foram instaladas quando o aquífero freático estava rebaixado e sem considerar a sua possível recuperação. Essas situações aparecem

tanto no ambiente rural como no urbano, mas são mais sérias em áreas urbanas.

Em ambientes rurais, os poços rasos mantêm o lençol freático abaixo do nível das raízes e depois, em solos permeáveis, o excesso de irrigação é naturalmente drenado para o subsolo. Quando águas de irrigação provenientes de outros locais são introduzidas e os poços locais cessam o bombeamento, o nível freático se recupera, e pode mesmo ser mais elevado devido a fluxos de retorno. Pode ocorrer dano às plan-

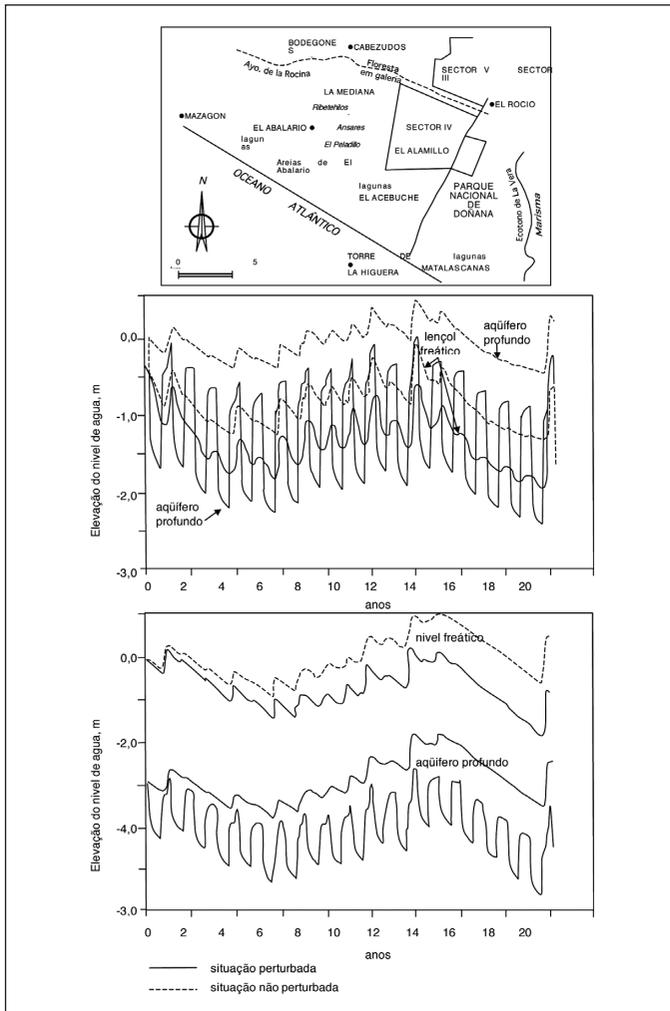


Fig. 5. Resultados de um bombeamento sazonal de água subterrânea cerca de 1,5 km de distância da área considerada, explotando o aqüífero profundo da figura 2. Existe um rebaixamento conspícuo na formação profunda, que comporta-se como semi-confina-da, e um rebaixamento suavizado no aqüífero freático, cada vez mais marcado. A figura superior refere-se a uma posição intermediária, no qual o fluxo vertical descendente domina. A inferior diz respeito à área de descarga próxima ao riacho La Rocina, onde em condições não perturbadas existe um fluxo vertical ascendente, mas que é temporariamente revertido pelas extrações. Em anos úmidos existe uma recuperação parcial dos níveis de água subterrânea, mas em realidade os períodos úmidos (nível freático raso) ficam mais curtos e os períodos secos (nível freático profundo) mais longos e mais freqüentes (modificado de Trick, 1998)

Fig. 5. Results of a seasonal pumpage of groundwater about 1.5 km from the considered area, explaining the deep aquifer of figure 2. There is a clear drawdown in the deep formation, behaving as a semiconfined one, and a smoothed drawdown in the water-table, increasing progressively. The upper figure refers to an intermediate position in which downward vertical flow dominates. The lower figure refers to the discharge area near the La Rocina ravine, where under undisturbed situation there is an upward vertical flow, but which is temporarily reversed by the abstractions. In wet years there is a partial recovery of groundwater levels, but in reality the wet periods (shallow water-table) become shorter and the dry periods (deep water-table) become longer and more frequent (modified from Trick, 1998)

tações e vegetais nativos, salinização do solo por evaporação direta do solo e perda de área agrícola por surgências ou alagamento, a menos que um sistema de drenagem seja instalado, o que é uma solução cara que é freqüentemente imposta à comunidade.

Em grandes cidades e suas zonas de periferia, a recuperação do nível freático pode ser a causa de inundações de porões, estacionamentos subterrâneos, túneis, tubulações de esgoto, usos diversos do espaço subterrâneo (como transformadores elétricos enterrados, fundações especiais), como é o caso em muitas cidades como Barcelona (fig. 6), Paris, Londres, Nova York, Mar del Plata (fig. 7) (Chilton, 1997), bem como mudanças conspícuas na qualidade da água subterrânea (Custodio, 1997; Bruce e McMahon, 1996).

Mudanças da composição química da água subterrânea

A utilização da água subterrânea pode afetar a qualidade da água pela modificação do padrão de fluxo e distribuição da água salinizada no subsolo, bem como pela penetração de água contaminada. Essa água contaminada pode ser o resultado do uso da própria água extraída. Tal é o caso de fluxos de retorno de irrigação, os quais em regiões semi-áridas com utilização eficiente dos recursos hídricos, ou pela aplicação de águas com alta salinidade, podem chegar a ser salobros e incorporar produtos agroquímicos também. Tudo isso representa uma grande preocupação em áreas rurais e é uma importante causa de degradação dos recursos hídricos subterrâneos. Em áreas costeiras a intrusão marinha e a mobilização de água salgada por poços e drenos podem produzir danos ambientais a jusante e nos campos, especialmente quando ocorre o fenômeno de subida salina ou formação de um cone invertido de água salobra por bombeamento (*upconing*). Em áreas urbanas e de periferia urbana, além do maior risco de poluição por fontes pontuais de contaminação (vazamentos, lixiviação de produtos), há uma fonte difusa formada por pontos dispersos de penetração de esgotos através de bueiros e tubulações com vazamentos, com o ambiente redutor devido à maior disponibilidade de matéria orgânica e pobre aeração devido à compactação do solo, pavimentação e edifícios.

As implicações ambientais referem-se às mudanças químicas da água subterrânea disponível para as plantas e que têm seu exutório nos rios, mananciais, lagos e áreas úmidas, e mesmo na costa. Este é um efeito retardado, o qual pode aparecer após anos ou dezenas de anos, dependendo do tamanho e caracte-

rísticas do sistema aquífero, e com padrões variáveis, devido às modificações dos contaminantes no subsolo pela troca catiônica, adsorção e processos redox. Frequentemente não há uma frente abrupta na chegada do contaminante, mas um lento aumento, e os efeitos podem durar muito tempo depois que as causas cessam de existir.

Os processos são bem conhecidos, porém casos bem documentados são escassos, e os efeitos

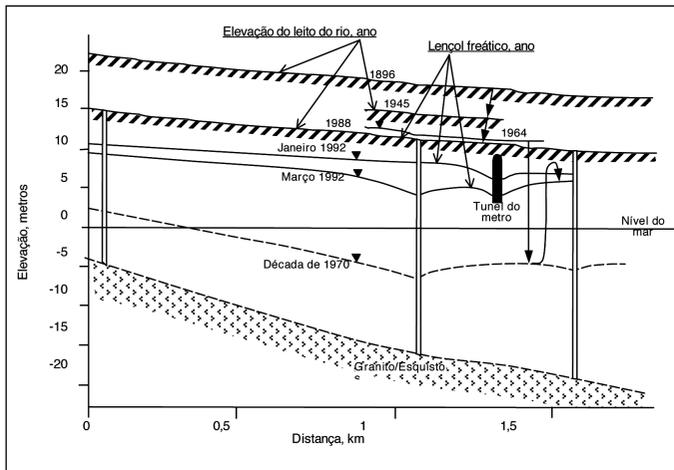
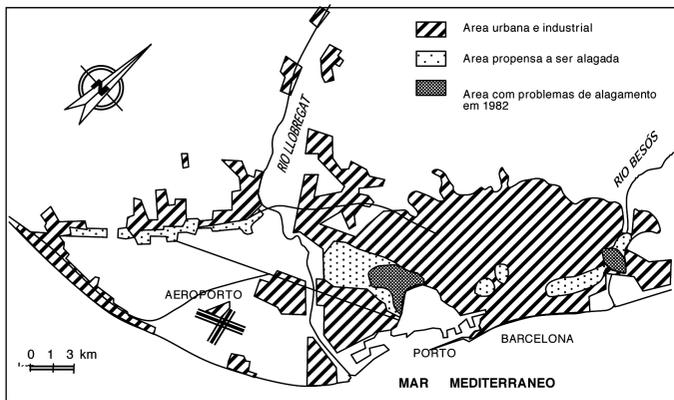


Fig. 6. Áreas ameaçadas de alagamentos e com ocorrência destes no ano de 1982 (segundo Custodio e Bayó, 1986), na planície costeira de Barcelona (figura superior), devido ao abandono progressivo de poços em áreas originalmente correspondentes a aquíferos com nível freático raso. Isso afeta estruturas subterrâneas, tais como a rede de metrô. A figura inferior mostra esse efeito em um trecho sob o rio (Vázquez-Suñé e Sánchez-Vila, 1997; Vázquez-Suñé et al., 1997)

Fig. 6. Areas more prone to flooding and where flooding occurred in 1992 (after Custodio and Bayó, 1986), in the coastal plain of Barcelona (upper figure), due to the progressive abandonment of wells in areas that originally where of shallow water-table. The lower figure shows this effect in a tract under the river (Vázquez-Suñé and Sánchez-Vila, 1997, Vázquez-Suñé, 1997)

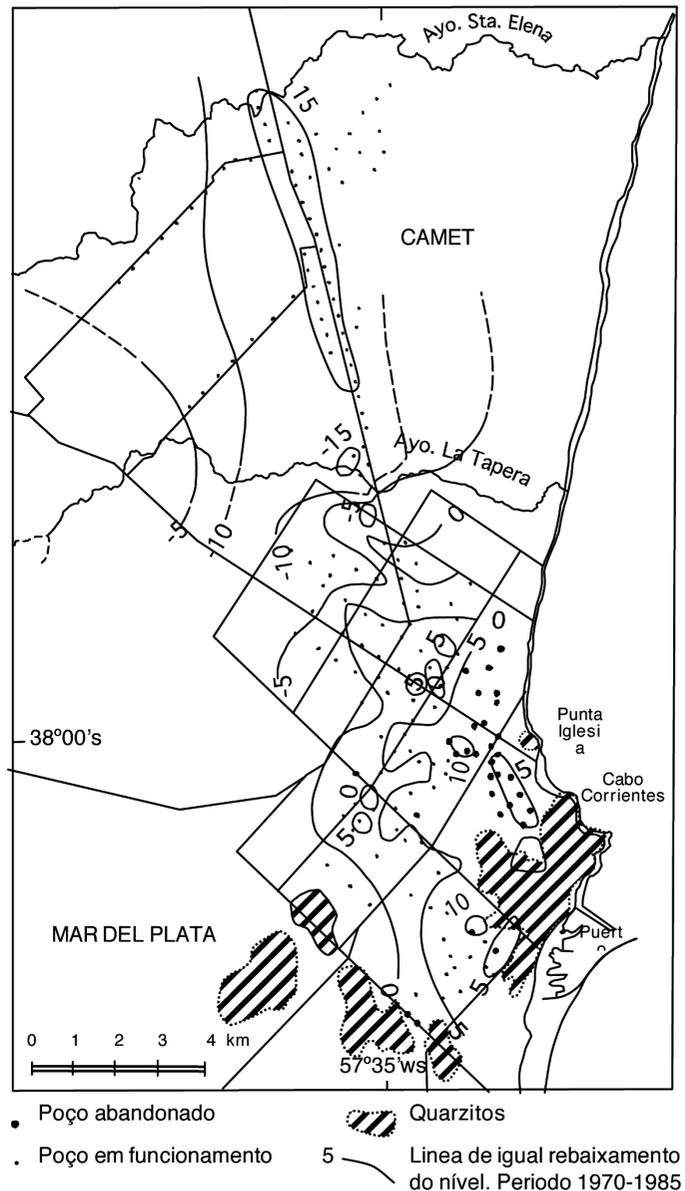


Fig. 7. Resultados da extração de água subterrânea em áreas urbanas e de periferia da cidade de Mar del Plata (Argentina), após parte dos poços da cidade terem sido fechados devido à má qualidade e contaminação salina, e substituídos por poços na periferia. As isolinhas mostram as mudanças no nível freático (em metros) entre 1970 e 1985 (segundo Bocanegra et al., 1992). Enquanto ocorre um progressivo rebaixamento do nível freático na zona periférica, na cidade ocorre uma recuperação que afeta as fundações de alguns edifícios altos devido à subpressão e ao ambiente corrosivo resultante da presença de água salgada

Fig. 7. Results of groundwater abstraction in urban and peri-urban areas of the town of Mar del Plata (Argentina), after some of the city wells were closed as the result of poor quality and saline contamination, and substituted by wells in the periphery. The isolines show the water-table changes (in meters) between 1970 and 1985 (after Bocanegra et al., 1992). While there is a progressive water-table drawdown in the peripheral area, in the city there is a recovery affecting the foundations of some high buildings as a consequence of under-pressure and the corrosive ambient resulting from the presence of salty water

ambientais não são bem conhecidos devido ao longo tempo de observação necessário para seguir convenientemente as modificações e completar um estudo de caso abrangente.

Os dois contaminantes mais conspícuos de significado regional são o aumento de salinidade (quadro 3) e o aumento do nitrato. Ambos contaminantes, especialmente o nitrato, que é um nutriente, afetam as espécies vegetais e sua produtividade. O comportamento do fósforo, também um nutriente essencial aplicado na terra cultivada, é menos conhecido. Em solos calcários, é retido como fosfato de cálcio insolúvel. O comportamento em solos silicosos é duvidoso. Ambientes redutores no subsolo podem produzir a descarga de ferro e manganês em forma reduzida, os quais não só se depositam em extensas áreas como também afetam a vida, envenenando a água, modificando a sua transparência e abaixando o pH quando se oxidam.

O transporte de praguicidas continua sob estudo mas em alguns casos, cada vez mais numerosos, sabe-se que algumas substâncias e seus produtos de degradação (metabólitos) estão aparecendo em mananciais e rios. O resultado final depende do produto químico, as características do solo, a profundidade do lençol freático e a atividade biológica.

Um outro aspecto do impacto ambiental derivado das modificações nas águas subterrâneas deve-se à mobilização mais rápida de águas salgadas ou salobras no solo após o aumento da recarga devido ao desflorestamento de grandes áreas a fim de obter terras para pastagens e culturas em zonas semi-áridas. Atualmente esta é uma preocupante causa de salinização de águas a jusante de tais áreas na Austrália, como na bacia de Murray (Simpson e Herczeg, 1991),

e provavelmente foi uma importante causa de mudanças ambientais no passado, quando grandes áreas foram desmatadas, como na região de Monegros (Aragão, Espanha).

Importância dos aspectos sociais

As águas subterrâneas cumprem um papel ecológico e social, e esses aspectos são finalmente os que decidem a sua importância e o modo de gerenciamento. Os aspectos hidrológicos não são mais que a parte básica do conhecimento. Mas as características próprias das águas subterrâneas, antes comentadas, bem diferentes das propriedades das águas superficiais têm conseqüências que até recentemente não haviam sido consideradas. Atualmente, o grande desenvolvimento da exploração do ciclo hidrológico subterrâneo necessita de um tratamento adequado.

Duas grandes dificuldades devem ainda ser superadas. Uma é a falta de conhecimento, experiência e mesmo vontade das organizações, instituições e governos (problema particularmente agudo em países como o Brasil e outros países em desenvolvimento, onde o conhecimento técnico hidrogeológico é ainda muito incipiente), que ademais não sabem como tratar com inúmeros usuários, muitos deles pequenos agricultores. Estes pequenos usuários têm formado e formam parte de uma revolução silenciosa a grande escala (Fornés *et al.*, 2005; Llamas e Martínez-Santos, 2005) atuando em grande parte fora do sistema administrativo. Outra grande dificuldade é a falta de consciência dos usuários a respeito das limitações dos aquíferos e de que se trata de um bem comum. Assim, sem uma regulação ou auto-regulação pode-se chegar a uma nova "tragédia dos comuns", isto é, a destruição do recurso por exploração intensiva pela pressão de que o que uma pessoa ou grupo poupe o deixe sem extrair, vai ser extraído por outro, contribuindo ao esgotamento das reservas.

O enorme número de atores inconexos leva a dificuldade ou impossibilidade para tratar efetivamente o problema por uma instituição externa. A única saída efetiva é o autocontrole. Isso demanda conhecimento das interrelações e criação da vontade para solucionar o problema coletivamente, cedendo os usuários parte da sua soberania e direitos para um gerenciamento comum (López-Gunn, 2007; López-Gunn e Martínez Cortina, 2006; Schallager e López-Gunn, 2006; Hernández-Mora e Llamas, 2001).

Os usuários devem criar associações que os representem e que disponham não somente de certa capacidade técnica, mas de representação legal, compro-

<ul style="list-style-type: none"> • Penetração de água marinha moderna • Existência de água marinha antiga não lixiviada devido a um gradiente de carga hidráulica muito pequeno e /ou permeabilidade muito baixa
<ul style="list-style-type: none"> • Aerossol marinho em áreas sujeitas a ventos intensos próximo à áreas costeiras • Concentração de água de chuva por evaporação na superfície do solo ou na zona superior do subsolo
<ul style="list-style-type: none"> • Evaporação do lençol freático em zonas úmidas • Dissolução de sais evaporíticos quando presentes no sistema aquífero • Mobilização de água salgada de camadas profundas, naturalmente ou de forma induzida pelo bombeamento
<ul style="list-style-type: none"> • Fluxo de retorno de irrigação ou quando águas altamente salinas são aplicadas
<ul style="list-style-type: none"> • Processos industriais, mineiros e de produção de gelo • Transporte de águas salinas através do terreno

Quadro 3. Possíveis origens da salinidade na água subterrânea
Table 3. Possible origins of the salinity of the groundwater

misso de co-gerenciamento e co-responsabilidade. Isto é uma mudança radical que precisa mais de uma geração humana para se instalar, mas que deve ser trabalhada desde agora. A experiência prévia é pequena, ainda que existe com aspectos diversos dada a variabilidade das circunstâncias sociais. Encontram-se exemplos na Califórnia, México (COTAS), Índia e Espanha (CUAS), com êxito variável e muitas dificuldades associadas. Na Espanha, o exemplo clássico - único em determinados aspectos - é o do Baixo Llobregat, rio localizado perto de Barcelona (Codina, 2004; Galofré, 1991). Outras associações para o gerenciamento coletivo estão sendo iniciadas, porém lentamente e por vezes com fracasos.

A governabilidade - ou governança como se diz atualmente em meios políticos - é um aspecto chave a considerar que precisa novas formas de abordagem. O *Hydrogeology Journal* dedicou todo um número especial a este tema (HJ, 2006), com especial consideração da exploração intensiva (Llamas e Custodio, 2003; Custodio *et al.*, 2005).

Referências

- Alcalá, F.J., Custodio, E. 2007. Recharge by rainfall to Spanish aquifers through chloride mass balance in the soil. *Groundwater and Ecosystems*. Proc. XXXV IAH Congress. Lisbon. (eds. L. Ribeiro, A. Chambel y M.T. Condesso de Melo). CD printing. 10 pp.
- Bocanegra, E., Martínez, D.E., Massone, H.E., Cionchi, J.L. 1992. Exploitation effect and salt water intrusion in the Mar del Plata aquifer, Argentina. *Study and Modelling of Salt Water Intrusion into Aquifers*. CIMNE-UPC. Barcelona: 177-191.
- Bruce, B.W., McMahon, P.B. 1996. Shallow groundwater quality beneath a major urban center; Denver, Colorado, USA. *J. Hydrol.*, 186: 129-151.
- Candela, L., Custodio, E., Navarro, A. 1998. El sól i les aigües subterrànies. *Medi Ambient i Tecnologia: Guia Ambiental de la UPC*. Politext 93, Edicions UPC. Barcelona: 69-85.
- Chilton, J.(ed.) 1997. *Groundwater in the urban environment: problems, processes and management*. Balkema: 1-682.
- Codina, J. 2004. Las aguas subterráneas: una visión social. El caso de la Comunidad del Delta del Llobregat. *Rev. Real Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat. (Esp.)*. Madrid. 98(2): 323-329.
- Collin, J.J., Margat, J. 1993. Overexploitation of water resources: overreaction or an economic reality? *Hydroplus*, 36: 26-37.
- Custodio, E. 1991. Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. Intern. Assoc. Hydrogeologists. *Selected Papers* 3, Heise: 3-27.
- Custodio, E. 1995. Comportamiento y papel de las aguas subterráneas en Doñana: consecuencias de las extracciones. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. Madrid, XX: 281-310.
- Custodio, E. 1996. Explotación racional de las aguas subterráneas. *Acta Geológica Hispánica*. JA-CSIC, Barcelona, 30(1-3): 21-28.
- Custodio, E. 1997. Groundwater quantity and quality changes related to land and water management around urban areas: blessings and misfortunes. *Groundwater in the Urban Environment: Problems, Processes and anagement*. Balkema: 11-22.
- Custodio, E. 2001. Effects of groundwater development on the environment. *Bol. Geolog. Minero*, Madrid, 111(6): 107-120.
- Custodio, E. 2002. Aquifer overexploitation, what does it mean?. *Hydrogeology Journal*, 10(2): 254-277.
- Custodio, E. 2005a. Groundwater as a key water resource. *Libro Homenaje al Profesor D. Rafael Fernández Rubio*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 68-78.
- Custodio, E. 2005b. Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. *Groundwater and Human Development* (Ed. E. Bocanegra, M. Hernández and E. Usunoff). Intern. Assoc. Hydrogeologists, Selected Papers no. 6. Balkema, Lisse: 15-38.
- Custodio, E., Bayó, A. 1986. Interactions between land-use and aquifer behaviour in the surroundings of Barcelona (Spain). *Integrated Land Use Planning and Groundwater Protection Management in Rural Áreas*, Karlovy Vari. Intern. Assoc. Hydrogeologists: 90-97.
- Custodio, E., Bruggeman, G.A. 1986. *Groundwater problems in coastal áreas*. Studies and Reports in Hydrology, 45. UNESCO Press. París: 1-596.
- Custodio, E., Llamas, M.R. 1976; 1983. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega. Barcelona. 2 vols: 1-2450.
- Custodio, E., Palancar, M. 1995. Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*. Madrid, 142(3340): 31-53.
- Custodio, E., Llamas, M.R., Samper, J. (eds.) 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Assoc. Intern. Hidrología Subterránea-Grupo Español/Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 1-455.
- Custodio, E., Kretsinger, V., Llamas, M.R. 2005. Intensive development of groundwater: concept, facts and suggestions. *Water Policy*, 7: 151-162.
- Falkland, A., Custodio, E. 1991. *Hydrology and water resources of small islands: a practical guide*. Studies and Reports in Hydrology, 49. UNESCO Press. París: 1-435.
- Fornés, J.M., de La Hera, A., Llamas, M.R. 2005. The silent revolution in groundwater intensive use and its influence in Spain. *Water Policy*, 7(3): 253-268.
- Foster, S.S.D. 1991. Unsustainable development and irrational exploitation of groundwater resources in developing nations: an overview. *Aquifer Overexploitation*. XXIII Congress Intern. Assoc. Hydrogeologists. Puerto de a Cruz. I: 385-402.
- Galofré, A. 1991. Las comunidades de usuarios de aguas subterráneas: experiencias en la gestión y control de los recursos hidráulicos en Cataluña. *Hidrogeología, Estado Actual y Prospectiva*. CIHS/CIMNE. Barcelona: 337-357.
- Garrido, A., Martínez-Santos, P., Llamas, M.R. 2006.

- Groundwater irrigation and its implications for water policy in semiarid countries: The Spanish experience. *Hydrogeology Journal*, 14(3): 340-349.
- Giordano, M., Villholth, K.G. (eds.) 2007. *The agricultural groundwater revolution: opportunities and threats to development*. CAB International, Wallingford, UK: 1-336.
- Hernández-Mora, N., Llamas, M.R. (eds.) 2001. *La economía del agua subterránea y su gestión colectiva*. Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid: 1-549.
- Hernández-Mora, N., Llamas, M.R., Martínez Cortina, L. 2001. Misconceptions in aquifer over-exploitation: implications for water policy in Southern Spain. In *Agricultural Use of Groundwater: Towards Integration between Agricultural Policy and Water Resources Management* (ed. C. Bori). Kluwer Acad. Publ., Dordrecht: 107-125.
- HJ 2006. *Social and economic aspects of groundwater governance*. Thematic Issue of Hydrogeology Journal, 14(3).
- Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I. 1990. *Groundwater recharge*. Intern. Assoc. Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology, 8. Heise, Hannover: 1-345.
- Llamas, M.R. 1988. Conflicts between wetland conservation and groundwater exploitation: two case histories in Spain. *Environmental Geology*. 11(3): 241-251.
- Llamas, M.R. 1990. Geohydrology of the eolian sands of the Doñana National Park (Spain). *Catena Supplement*. 18: 145-154.
- Llamas, M.R. 1992. Wetlands: an important issue in hydrogeology. Aquifer Overexploitation. Inter. Assoc. Hydrogeologists. *Selected Papers 3*, Heise: 69-86.
- Llamas, M.R., Martínez Cortina, L. 2002. Groundwater irrigation and poverty alleviation. *Proc. IWRA Regional Symposium: Water for Human Survival*, New Delhi, Central Board for Irrigation and Power, 2: 134-143.
- Llamas, M.R., Custodio, E. 2003. *Intensive use of groundwater: challenges and opportunities*. Balkema, Lisse: 1-478.
- Llamas, M.R., Martínez-Santos 2005. Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflicts. *J. Water Resources Planning and Management*. 337-341.
- López-Camacho, B., García Jiménez, M.A. 1991. El acuífero de La Mancha Occidental y el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel; situación hidráulica y medidas técnicas y administrativas adoptadas. *Aquifer Overexploitation*. Intern. Assoc. Hydrogeologists. Puerto de a Cruz. 1: 145-150.
- López Geta, J.A., Fornés, J.M., Ramos, G. Villarroja, F. 2001. *Las aguas subterráneas, un recurso natural del subsuelo*. Instituto Geológico y Minero de España/Fundación Marcelino Botín. Madrid: 1-94.
- López-Gunn, E. 2007. Groundwater management in Spain: Self-regulation as an alternative for the future?. In: *The Global Importance of Groundwater in the 21 Century* (ed. S. Ragone). The National Ground Water Association Press, Westerville, Ohio: 351-357.
- López-Gunn, E., Martínez-Cortina, L. 2006. Is self-regulation a myth?: Case study on Spanish groundwater user association and the role of higher-level authorities. *Hydrogeology Journal*, 14(3): 361-375.
- Margat, J. 1992. The overexploitation of aquifers. *Selected Papers on Aquifer Overexploitation*. Intern. Assoc. Hydrogeologists. *Selected Papers 3*, Heise: 29-40.
- Pérez Adán, J. 1992. El pensamiento "ecológico" de Juan Pablo II. *Estudios sobre la Encíclica "Centesimus Annus"*. Aedos-Unión Editorial. Madrid: 333-350.
- Price, M. 2002. Who needs sustainability?. *Sustainable Groundwater Development* (eds. K.M. Hiscock, M.O. Rivett and R.M. Davison). Balkema Publ. Lisse, The Netherlands: 191-207.
- Ragone, S., Hernández-Mora, N., de La Hera, A., Bergkamp, G., McKay, J. (eds) 2007. *The global importance of groundwater in the 21st Century*. Proc. Intern. Symp. Groundwater Sustainability. Nat. Groundwater Assoc. Press, Westerville, Ohio: 1-382.
- Ramos, A. 1993. *¿Por qué la conservación de la Naturaleza?*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid: 1-156.
- Sahuquillo, A., Capilla, J., Martínez-Cortina, L. Sánchez-Vila, X. 2005. *Groundwater intensive use*. Intern. Assoc. Hydrogeologists, *Selected Papers Series 7*. Balkema, Leiden: 1-450.
- Schlager, E., López-Gunn, E. 2006. Collective systems for water management: is the tragedy of the common a myth?. *Water Crisis: Myth or Reality* (eds. M.R. Llamas & P. Rogers). Balkema, Amsterdam: 43-58.
- Shah, T. 2005. Groundwater and human development: Challenges and opportunities in livelihoods and environment. *Water Science and Technology*, 8: 27-37.
- Simpson, H.J., Herczeg, A.L. 1991. Salinity and evaporation in the river Murray Basin, Australia. *Journal of Hydrology*, 124: 1-27.
- Suso, J.; Llamas, M.R. 1991. Estudio hidrogeológico de la influencia de los bombeos en la zona de El Rocío. *Estudios Geológicos*, 46: 317-345.
- Trick, Th. 1998. *Impactos de las extracciones de agua subterránea en Doñana: aplicación de un modelo numérico con consideración de la variabilidad de la recarga*. Dep. Eng. Terreno / ETSICCP, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. Tese doctoral.
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X. 1996. Cálculo del balance y recarga en la ciudad de Barcelona. *La Recarga Natural de Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asoc. Intern. Hidrogeólogos/Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid: 399-406.
- Vázquez-Suñé, E., Sánchez-Vila, X., Carrera, J., Marizza, M., Arandes, R., Gutiérrez, L.A. 1997. Rising groundwater levels in Barcelona: evolution and effect on urban structures. *Groundwater in the Urban Environment: Problems, Processes and Management*. Balkema: 267-272.
- Younger, P.L. 2007. *Groundwater in the environment, an introduction*. Blackwell Publ. Oxford: 1-317.

Recibido: febrero 2008

Aceptado: abril 2008