



MUDANÇA GLOBAL & ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

MENSAGENS-CHAVE

- as águas subterrâneas fornecem um excelente ‘amortecedor’ contra a variabilidade climática dos suprimentos de água superficial (apoiando assim a adaptação às mudanças climáticas), devido às reservas armazenadas dos sistemas aquíferos
- os impactos do aquecimento global induzido pelo homem nas águas subterrâneas permanecem incertos, mas são motivo de preocupação, devido à sua rápida taxa de mudança em comparação com as oscilações climáticas naturais
- registros paleoambientais revelam que grandes mudanças nos sistemas de águas subterrâneas ocorreram como resultado de ‘mudanças climáticas naturais’ nos últimos 10.000 a 500.000 anos, e que oscilações mensuráveis na taxa e salinidade da recarga ocorreram nos últimos 50 a 100 anos
- algumas mudanças antropogênicas no uso da terra já causaram grandes impactos nas águas subterrâneas, tendo como maiores indutores a intensificação da produção agrícola em resposta ao crescimento populacional global e a demanda por alimentos
- a diminuição dos recursos hídricos subterrâneos desde a década de 1950, principalmente por bombeamento de poços para agricultura irrigada, levou indiretamente a uma transferência líquida de água da terra para o mar, contribuindo para o aumento do nível do mar

Como as mudanças globais no clima e no uso da terra se relacionam com as águas subterrâneas?

As águas subterrâneas (contidas em sedimentos e rochas) constituem a reserva predominante de água doce do planeta, geralmente com tempos de armazenamento de décadas a séculos e milênios. Os recursos de água subterrânea funcionam, portanto, como um excelente ‘amortecedor’ contra os efeitos da variabilidade climática no suprimento de água superficial, devido às reservas armazenadas, geralmente grandes e amplamente distribuídas, dos sistemas aquíferos. Porém, surgem questões sobre quão naturalmente resilientes são as reservas de água subterrânea frente às mudanças globais e se estamos fazendo o suficiente para ajudar a conservá-las e protegê-las.

As águas subterrâneas fluem para dentro e para fora dos sistemas aquíferos na subsuperfície, com seu armazenamento sendo aumentado ou reduzido como resultado de mudanças nesse equilíbrio, que varia temporalmente e é controlado por condições naturais e atividades humanas, com:

- influxos em áreas de recarga – principalmente devido a infiltração natural de excesso de chuvas e corpos d’água superficiais e como resultado de práticas de irrigação agrícola (e mais localmente de infiltração por vazamentos nas tubulações de águas urbanas e em redes de saneamento de águas residuais)

UM OÁSIS SAARIANO – FORMADO POR DESCARGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS ARMazenADAS EM GRANDES SISTEMAS AQUÍFEROS POR 10.000-1.000.000 ANOS



- vazões – por descargas naturais em nascentes e cursos d'água, pântanos e lagoas, e por bombeamento de poços de água.

Antes da atividade antropogênica em larga escala (antes de 1850 e antes de 1950 em muitas regiões), o impacto humano nos sistemas de águas subterrâneas (em termos de modificação, captação e poluição) era pequeno em comparação com o recurso disponível. A maioria dos sistemas aquíferos estava em equilíbrio entre recarga e descarga, e a qualidade natural das águas subterrâneas era geralmente excelente. Mas, devido ao crescimento populacional, à intensificação agrícola, à urbanização/industrialização e à modificação climática, foram criadas pressões crescentes sobre as águas subterrâneas.

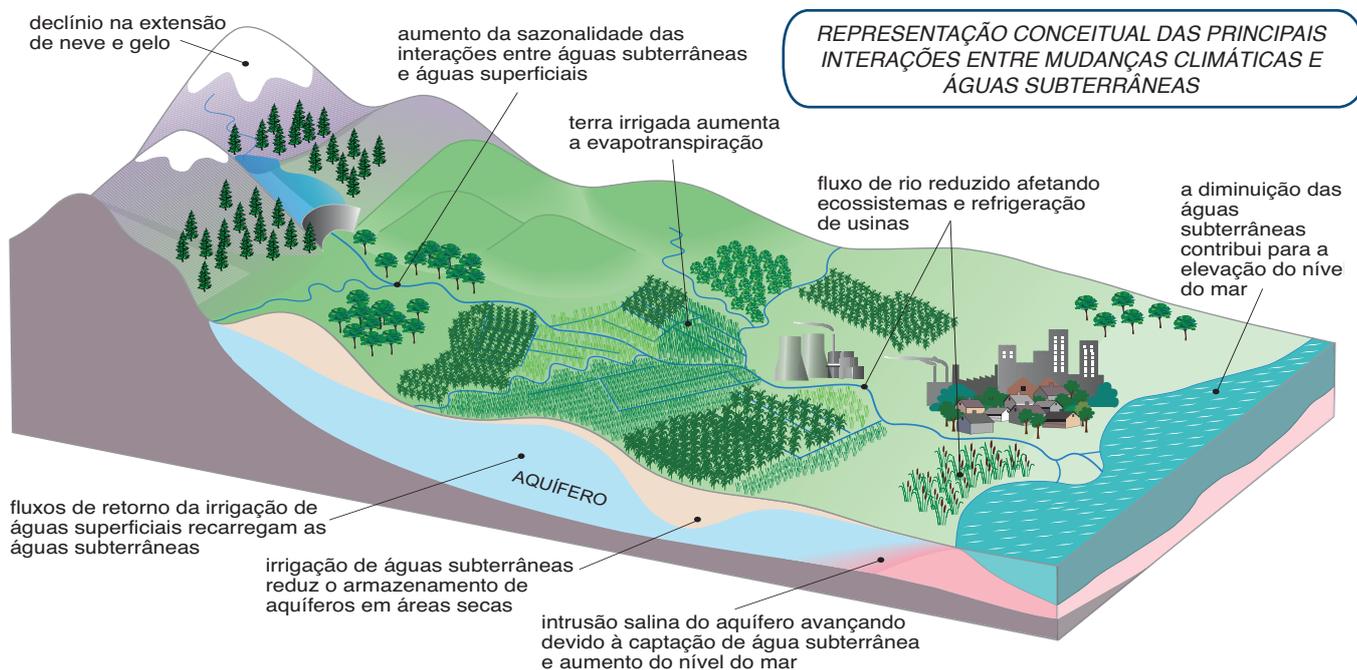
O foco deste documento estratégico é revisar a compreensão atual dos impactos em larga escala da mudança climática e do uso antrópico da terra em nossos recursos de água subterrânea, em termos de quantidade e qualidade⁽¹⁾. No futuro, ao fazer um balanço da sustentabilidade social das atividades humanas, será essencial considerar cuidadosamente a diminuição e a degradação das águas subterrâneas, e em termos de seu impacto no capital ambiental.

(1) outros resumos desta série abordaram questões de produção agrícola (Segurança Alimentar & Águas Subterrâneas), urbanização (Cidades Resilientes & Águas Subterrâneas) e poluição industrial (Saúde Humana & Águas Subterrâneas)

Qual é o provável efeito do aquecimento global nas águas subterrâneas?

A estimativa das taxas contemporâneas (e previsão futura) de recarga de água subterrânea é de fundamental importância quando se considera a sustentabilidade dos recursos – em áreas com crescente aridez, a recarga de chuvas se tornará menos significativa do que a recarga indireta do escoamento superficial e do que a recarga casual a partir da atividade humana.

Ainda existe uma incerteza significativa sobre o efeito preciso do aquecimento global na recarga das águas subterrâneas em diferentes regiões. Por um lado, temperaturas ambientes mais altas provocam menos chuvas, porém mais intensas, e pode ocorrer um aumento da recarga (compensando o aumento da evapotranspiração), de modo que em alguns aquíferos fissurados (de baixo armazenamento), o nível freático pode subir para cotas mais elevadas do que as registradas anteriormente, causando danos à propriedade e às colheitas. Por outro lado, eventos de chuvas menores, porém mais intensos, esgotam a umidade do solo e podem levar à erosão e ravinamentos, ou à compactação do solo, o que reduzirá a capacidade de infiltração e a recarga das águas subterrâneas.



É importante observar que as ‘taxas naturais’ de mudanças climáticas e de cobertura da terra experimentadas regularmente nos últimos 400.000 anos foram mais lentas do que as mudanças induzidas pelo homem. A menor taxa prevista de aquecimento global é cerca de 10 vezes maior do que a ocorrida anteriormente, o que levanta preocupações sobre o efeito na recarga das águas subterrâneas, especialmente em aquíferos de baixo armazenamento dos quais milhões dependem em regiões tropicais. No entanto, dada a inércia de armazenamento de muitos grandes aquíferos, apenas as mudanças climáticas sustentadas começarão a esgotar as reservas de água subterrânea disponíveis.

Em contraste, o aumento da captação de águas subterrâneas e algumas mudanças importantes no uso da terra são capazes de exercer um grande impacto na recarga e na qualidade das águas subterrâneas nas próximas décadas. Assim, no futuro, os impactos combinados do aquecimento global, mudança no uso da terra e exploração das águas subterrâneas devem ser considerados.

O que o registro paleoambiental revela sobre a influência da variabilidade natural do clima nas águas subterrâneas?

A resposta a longo prazo dos sistemas de água subterrânea à variabilidade natural do clima, independente da atividade humana, pode ser identificada a partir de evidências paleoambientais. Em seu estado natural, a maioria dos sistemas de água subterrânea e sua cobertura da terra se adaptaram aos principais ciclos de mudanças climáticas nos últimos 200.000 anos ou mais. E, a curto prazo, para algumas regiões semiáridas (como o Sahel), os perfis de isótopos e cloretos da ‘umidade da zona não saturada’ acima dos aquíferos revelam que nos últimos 50-100 anos houve uma oscilação acentuada da taxa de recarga e salinidade das águas subterrâneas causada por ciclos de seca.

Além disso, as águas subterrâneas de muitos sistemas aquíferos de grande porte nas regiões mais áridas do mundo revelam que a maioria

das águas subterrâneas foi recarregada de 5.000 a 500.000 anos atrás ou mais, durante episódios passados de clima mais frio e úmido (por exemplo, o aquífero do Arenito Núbio no Saara) — e, nessas áreas, o ‘perfil da zona não saturada’ indica que pouca recarga de chuva (< 5 mm/a) ocorreu posteriormente. Como a recarga contemporânea é responsável por apenas uma pequena fração da água subterrânea desses aquíferos, seus recursos podem ser considerados ‘não renováveis’ e os suprimentos de água que eles fornecem altamente resilientes à variabilidade climática atual. No entanto, no final, seu uso será limitado no tempo e, como tal, merece cuidadosa consideração — atualmente os países mais dependentes de tais recursos são a Líbia, a Arábia Saudita e a Argélia, com uso significativo também na Austrália, China, Irã, Egito, Tunísia, Botsuana, Mauritânia, Peru e EUA.

De que maneiras o uso da água subterrânea contribui para a mudança global?

As águas subterrâneas têm sido uma fonte vital de abastecimento doméstico de água e irrigação agrícola ao longo da história da humanidade. Porém, a captação intensiva de águas subterrâneas começou nos anos 50 do Século XX, após grandes avanços no conhecimento geológico, perfuração de poços de água, tecnologia de bombas e eletrificação rural. A captação global de água subterrânea ainda está aumentando, tendo atingido os 900 km³/a em 2010, e fornece cerca de 36% do abastecimento de água potável, 42% da água para a agricultura irrigada e 24% do abastecimento industrial direto de água. A intensidade de retirada é mais alta em grande parte da China, Índia, Paquistão e Irã, e partes de Bangladesh, México, EUA, UE, Norte da África e Oriente Médio. As estimativas das taxas de redução permanente do armazenamento variaram de 100 a 145 km³/a durante 2000-08⁽²⁾.

O declínio dos recursos hídricos subterrâneos contribui indiretamente para o aumento global do nível do mar (com sérias consequências para as áreas costeiras), criando uma transferência de água do armazenamento terrestre de longo prazo

(2) Doell et al (2012), Wada et al (2016)

para a circulação na hidrosfera da superfície. Esse processo está sujeito a incertezas devido à imprecisão inerente ao balanço de água de aquíferos a longo prazo, ao armazenamento médio drenável por unidade de aquíferos empobrecidos e à proporção de água subterrânea extraída remanescente no microclima local. Estimativas recentes vão até 0,6 mm/a, com um valor de 0,3 mm/a (equivalente a 106 km³/a de transferência de água ou 18% da elevação atual do nível do mar) sendo o mais provável durante 2000-08⁽³⁾.

Quais mudanças no uso da terra estão causando os maiores impactos nos recursos hídricos subterrâneos?

Toda prática de uso da terra, e mudança de uso da terra, deixa uma marca nos recursos hídricos. Isso é particularmente importante para as águas subterrâneas, porque algumas mudanças no uso da terra podem ter efeitos duradouros e extremamente caros de mitigar. As mudanças mais significativas nas águas subterrâneas incluem remoção da vegetação natural e florestas, conversão de pastagens em terras aráveis, estender a fronteira da agricultura irrigada, intensificar a agricultura de sequeiro e irrigada, introduzir culturas para biocombustíveis, reflorestamento/restauração com florestas comerciais – e, é claro, urbanização⁽¹⁾. Essas várias práticas de uso da terra deixam assinaturas diferentes:

(3) Konikow (2011), Wada et al (2016)

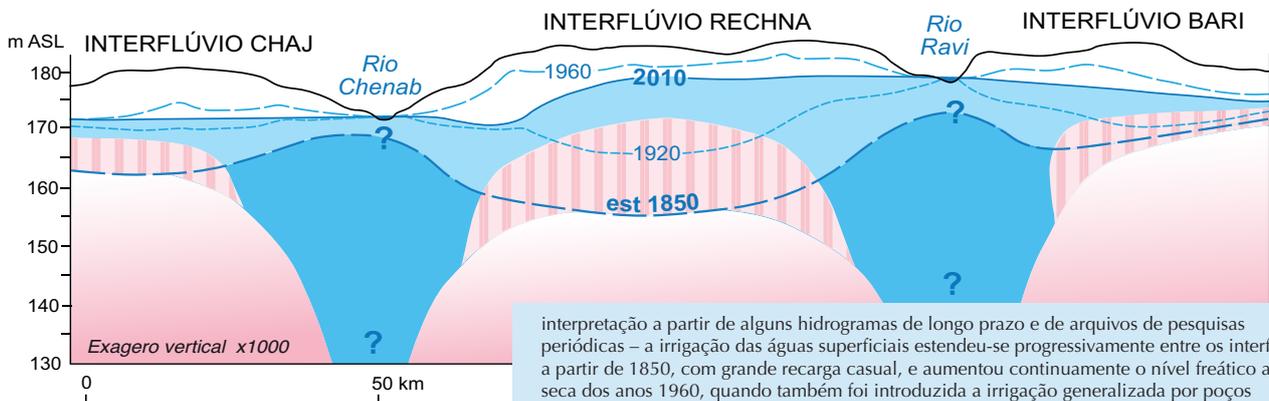
- na qualidade da recarga – resultando, em alguns casos, em poluição difusa das águas subterrâneas, independentemente das condições climáticas
- nas taxas de recarga e salinidade – significativas especialmente em condições mais áridas.

Globalmente, nos últimos 250 anos, mais da metade da terra livre de gelo foi modificada pela atividade humana, principalmente quanto a conversão de florestas nativas em terras aráveis (70%) e pastagens (30%)⁽⁴⁾. Até 1950, a taxa de conversão era superior ao crescimento populacional e ocorria principalmente na Ásia, Europa e América do Norte. A conversão global tardia diminuiu e a maior parte do desmatamento está ocorrendo na América e na Ásia tropicais. Essas mudanças resultam do crescimento populacional e do aumento da demanda por alimentos, mas não é um relacionamento simples. Desde 1960, a população global mais que dobrou, mas o consumo de alimentos triplicou, com apenas uma expansão de 10% das terras agrícolas (uma vez que o aumento da produção veio da intensificação da colheita e da melhoria do rendimento das culturas).

Entre as principais mudanças no uso da terra, o desmatamento e a expansão da agricultura irrigada (usando água importada da superfície) têm a maior influência nas águas subterrâneas – com a última aumentando significativamente a recarga e alterando a qualidade da água, porque o excesso de água

(4) Foster & Cherlet (2016)

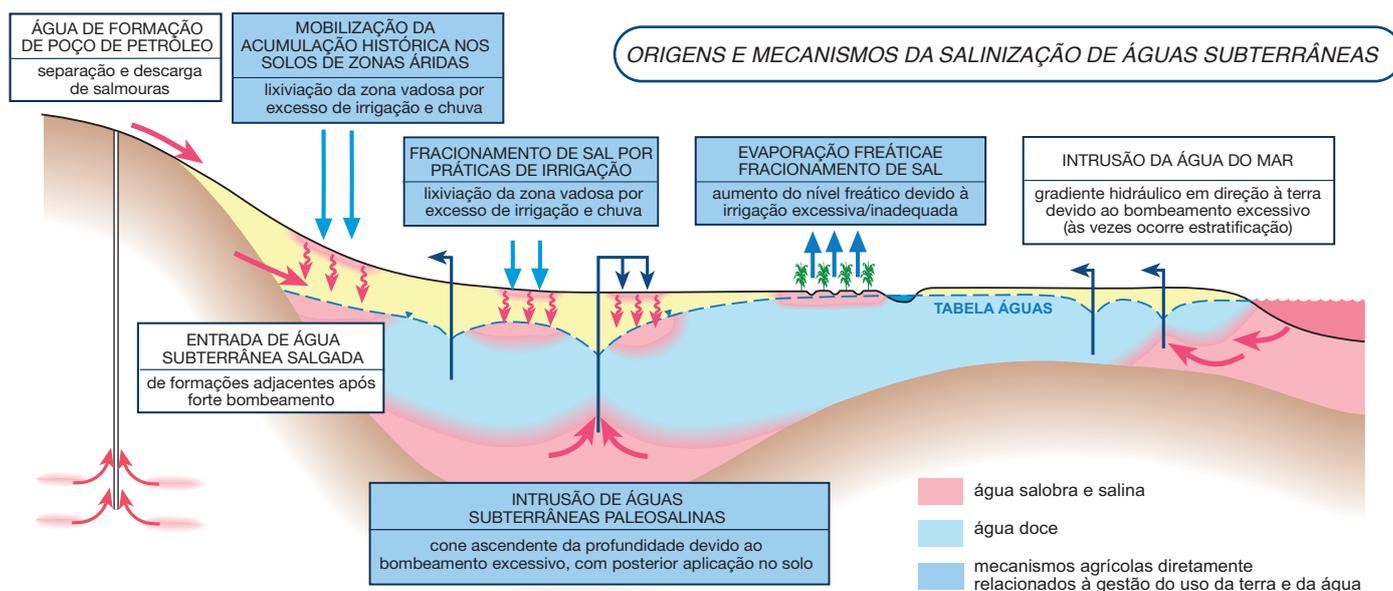
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DAS MUDANÇAS NO SISTEMA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA PLANÍCIE DO INDUS NO MÉDIO PUNJAB DE 1850 a 2010



interpretação a partir de alguns hidrogramas de longo prazo e de arquivos de pesquisas periódicas – a irrigação das águas superficiais estendeu-se progressivamente entre os interflúvios a partir de 1850, com grande recarga casual, e aumentou continuamente o nível freático até à seca dos anos 1960, quando também foi introduzida a irrigação generalizada por poços

posição pré-irrigação (1850) inferida a partir da água conata

aumento aproximado do nível de águas subterrâneas significativamente salinas como resultado de bombeamento intensivo de poços de água para irrigação durante 1960-2010 — também haverá salinização superficial (não mostrada) perto da rede de canais de irrigação e em áreas irrigadas apenas com água subterrânea



de irrigação se infiltra nos aquíferos superficiais. Mas intensificar o cultivo de vegetais e frutas irrigados usando ‘irrigação de precisão’ (como sistemas pressurizados de gotejamento e micro aspersão) pode diminuir acentuadamente as taxas de recarga e aumentar a salinidade da recarga.

Existem muitos exemplos gráficos, para os mais variados tipos climáticos, dos principais impactos das mudanças no uso da terra agrícola nas águas subterrâneas:

- a introdução de irrigação em larga escala de águas superficiais em algumas áreas semiáridas levou a um grande acúmulo de água subterrânea ao longo de décadas a partir de meados do século XIX, principalmente no Paquistão e no Punjab Indiano
- na Europa Mediterrânea e nos EUA, o desenvolvimento de atividades hortícolas intensivas para a produção de frutas e vegetais resultou em séria poluição das águas subterrâneas com nitratos e inseticidas persistentes
- na agricultura de sequeiro, a conversão generalizada de extensas pastagens em cultivo intensivo de cereais a partir da década de 1950 na Europa Ocidental causou uma mudança acentuada na qualidade da recarga de águas subterrâneas com poluição difusa por nitratos e herbicidas persistentes.

Globalmente, uma área cada vez maior de terras agrícolas (atualmente 1,6 milhões de ha) é impactada pela salinização – compensando grande

parte do ganho de produtividade agrícola em outros lugares⁽⁴⁾. Muitas das causas estão relacionadas às águas subterrâneas:

- evaporação direta de aquíferos freáticos superficiais, frequentemente associada a irrigação ineficiente usando água de superfície importada em áreas com drenagem natural inadequada
- salinidade natural mobilizada a partir de profundidade nos sistemas de águas subterrâneas através da construção e bombeamento descontrolados de poços de água e da lixiviação do subsolo salino após a remoção da vegetação natural
- acumulação de salinidade do solo ao irrigar com água subterrânea mineralizada, que é posteriormente lixiviada para aquíferos superficiais.

Compreender as ligações entre o uso da terra agrícola e as águas subterrâneas é uma base essencial para a gestão integrada dos recursos hídricos e, embora essas ligações tenham sido reconhecidas há muito tempo, elas ainda não foram amplamente traduzidas nas políticas e práticas de gestão da terra.

Hoje, forças de larga escala, especialmente a globalização dos mercados, tornaram-se os principais impulsionadores da mudança no uso da terra, com certos fatores nacionais e locais atenuando ou ampliando seus efeitos. Eles influenciam não apenas as escolhas de uso da terra de milhões de pequenos produtores, mas também as de grandes investidores internacionais (privados e estatais).



MUDANÇA GLOBAL & ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Estima-se que projetos de terras agrícolas de larga escala nos países menos desenvolvidos tenham envolvido pelo menos 36 M ha de terra desde 2000. Onde acordos de terras de larga escala ocorrem sem o consentimento aberto e informado dos atuais usuários locais, eles são chamados de 'apropriação de terras', e essas aquisições de terra geralmente também implicam acesso preferencial (e não totalmente investigado) às águas subterrâneas.

Em países de baixa renda, há uma necessidade premente de aumentar a produção de grãos básicos, como milho, arroz e trigo, cujos rendimentos são geralmente de apenas 30 a 50% daqueles na agricultura mais 'avançada'. O aumento da produção pode ser buscado através da introdução de irrigação e/ou melhoria das práticas de manejo do solo e da água, mas pode não ser adequado em alguns ambientes ecológicos. Crescem as preocupações sobre o impacto nas águas subterrâneas devido ao aumento do uso consumptivo de água, salinidade e lixiviação de nutrientes e/ou pesticidas.

REFERÊNCIAS SELECIONADAS

- Basharat M, Hassan D, Bajkani A A & Sultan S J 2014 Surface water and groundwater nexus – groundwater management options for the Indus Basin irrigation system. IWASRI Publication 2 99. International Waterlogging & Salinity Research Institute (Lahore)
- Doell P et al 2012 Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations. *Journal Geodynamics* 59-60 : 143-156
- Doell P et al 2014 Global-scale assessment of groundwater depletion and related ground water abstractions : combining hydrological modeling with information from well observations and GRACE satellites. *Water Resources Research* 50 : 5698-5720
- Edmunds W M & Tyler S W 2002 Unsaturated zones as archives of past climates : towards a new proxy for continental regions. *Hydrogeology Journal* 10 : 216-228
- Foster S S D & Loucks D P 2008 Non-renewable groundwater resources – a guide to socially-sustainable management for water-policy makers. UNESCO-IHP VI Groundwater Series 15(Paris)
- Foster S & MacDonald A 2014 The 'water security' dialogue – why it needs to be better informed about groundwater. *Hydrogeology Journal* 22 : 1489-1492
- Foster S & Cherlet J 2014 The links between land-use and groundwater – governance provisions and management strategies to secure a 'sustainable harvest'. *Global Water Partnership Perspectives Paper* (Stockholm)
- Konikow L F 2011 Contribution of global groundwater depletion since 1900 to sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 38 : L17401
- Margat J & Gun J van der 2013 *Groundwater around the world - a geographical synopsis* Taylor & Francis (London)
- Quereshi A S, Gill M A & Sarwar A 2008 Sustainable groundwater management in Pakistan. *Irrigation & Drainage* 59 : 107-116
- Taylor R G et al 2013 Groundwater and climate change. *Nature Climate Change* 3 : 322-329
- UNESCO - IHP 2015 Groundwater and climate change - mitigating the global ground water crisis and adapting to climate change. UNESCO - International Hydrological Programme GRAPHIC Project Position Paper (Paris)
- Voss C I & Soliman M 2013 The transboundary non-renewable Nubian Aquifer System of Chad, Egypt, Libya and Sudan : classical groundwater questions and parsimonious hydrogeologic analysis and modelling. *Hydrogeology Journal* 22 : 441-468
- Wada et al 2016 Fate of water pumped from underground and contributions to sea-level rise. *Nature Climate Change* (on-line) DOI: 10.1038/NCLIMATE3001

AÇÕES PRIORITÁRIAS

- são necessárias investigações mais detalhadas e monitoramento de longo prazo dos sistemas de água subterrânea para estabelecer o status atual dos seus recursos e dinâmica de fluxo, e para confirmar as tendências atuais em alterações de armazenamento e qualidade
- é necessário fazer um esforço sistemático para refinar a prática operacional para o gerenciamento adaptativo dos recursos hídricos, especialmente na promoção do uso conjuntivo das águas subterrâneas e superficiais, em vez de tratá-las como recursos separados
- são necessárias pesquisas detalhadas (em uma variedade de ambientes topográficos e hidrogeológicos) sobre a resposta da recarga das águas subterrâneas à variação da intensidade das chuvas, aumento da temperatura de superfície e mudanças no uso da terra, de modo a elevar o entendimento a um nível comparável ao alcançado para recursos hídricos superficiais
- é necessária uma melhor modelagem numérica temporal e espacial em larga escala dos sistemas de águas subterrâneas (condicionada a melhores dados de campo) para avançar na compreensão de como esses sistemas provavelmente responderão às pressões criadas pelos principais usos da terra e mudanças climáticas aceleradas