

## 8 - Aquíferos

Aquíferos são formações geológicas subterrâneas capazes de armazenar água. Esses grandes depósitos de água são alimentados pela precipitação atmosférica, que traz a água dos mares aos continentes, que acaba por adentrar nos aquíferos através do mecanismo da infiltração em suas áreas de recarga (Fig. 8.1).

A água subterrânea, como um componente do ciclo hidrológico, está em constante circulação e flui, de modo geral, lentamente, pelos poros da rocha. Os aquíferos contêm, ao mesmo tempo, rochas com características porosas e permeáveis e impermeáveis que formam estruturas geológicas capazes de armazenar e ceder água. Um dos parâmetros que influenciam o fluxo da água subterrânea é a permeabilidade. Já a porosidade é a propriedade que determina a quantidade de água que pode ser armazenada em uma rocha. A porosidade é determinada pelo volume de poros vazios em relação ao volume total da rocha (Iritani & Ezabi, 2012).

### Aquíferos confinados e não confinados

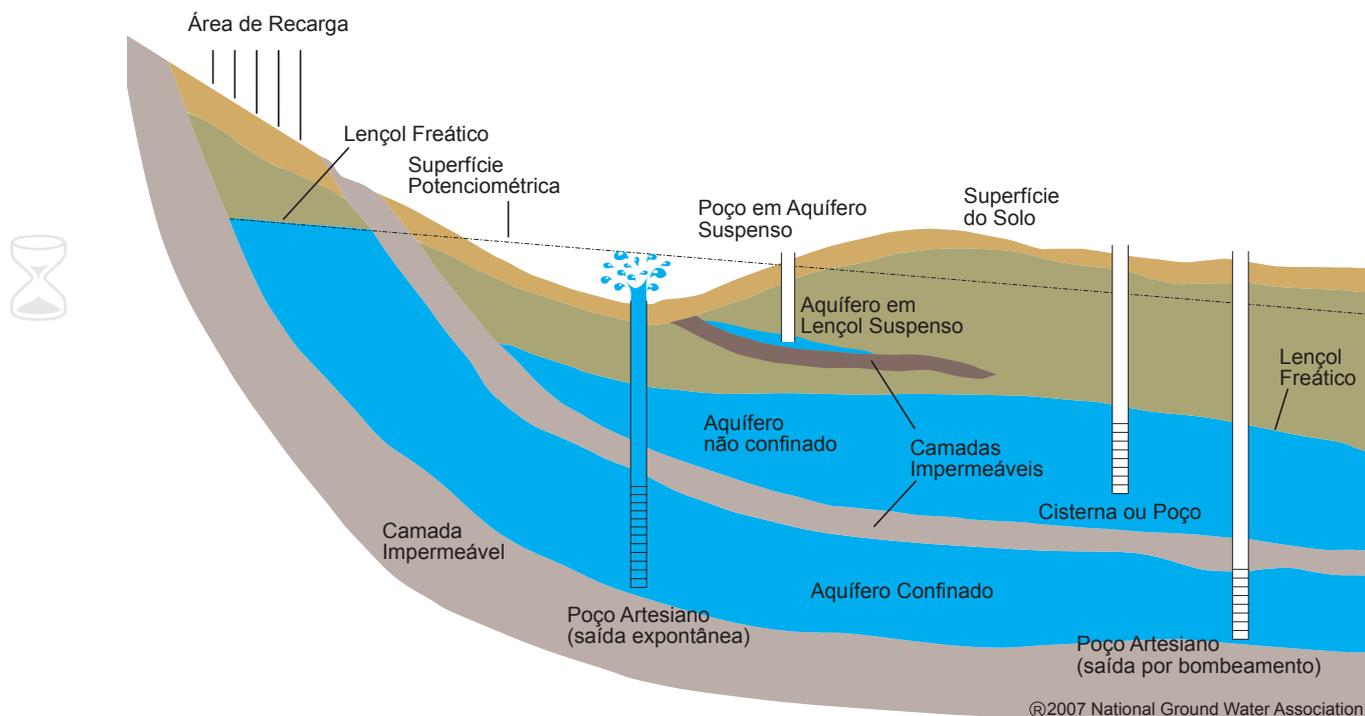


Figura 8.1- Tipos de aquíferos confinados e não confinados que mostram as diferenças entre mina de água (cisterna), poço freático, poço artesianos e poço artesianos de água com pressão, bem como uma representação do lençol freático

A água dos aquíferos vêm sendo usada pelo homem desde a antiguidade e são, em muitos casos, a única fonte de água para muitas populações humanas. A capacidade de armazenamento de água de um aquífero depende da extensão e espessura da camada de rochas permeáveis à água ou de material não consolidado (seixos, areia ou silte) do qual se pode extrair água por meio de um poço (Fig. 8.1).

A crosta terrestre pode ser dividida em dois compartimentos: (1) a zona saturada ou freática (i.e: os aquíferos, propriamente ditos) onde todos os espaços disponíveis estão ocupados pela água; (2) a zona não saturada é caracterizada pela existência de espaços não ocupados pela água. A pressão da água na zona saturada é geralmente maior do que a pressão atmosférica. Um poço, ao atingir essa zona, irá

permitir que a água jorre sem qualquer bombeamento. A pressão da água nas zonas não saturadas não é suficiente para a extração livre e água necessita de ser bombeada para a superfície. O limite entre essas duas zonas é conhecido como sendo o lençol freático (*water table*).

Os aquíferos podem ser divididos em duas grandes categorias: os aquíferos de baixa permeabilidade, ou aquíferos confinados (1) e os não confinados (2), que são mais permeáveis e usualmente estão conectados a nascentes.

Os aquíferos do tipo confinados (1) possuem, em geral, uma baixa condutividade hidráulica (Schwartz & Zhang, 2003). Esses são, na realidade, os dois limites para o espectro de uma série de aquíferos encontrados na crosta terrestre. Os aquíferos não confinados ou freáticos (2), têm como seu limite superior o lençol freático. O lençol freático (*water table*) e a zona não saturada são conceitos importantes. O lençol freático é determinado pela profundidade que a água atinge em um poço livremente perfurado no solo. Acima dessa profundidade, temos a zona não saturada.

Tipicamente, o aquífero mais superficial encontrado em uma dada região é do tipo não confinado. A distinção geológica entre esses dois extremos não é clara. Podem ser diferenciados pela velocidade de recomposição do estoque de água existente em seu interior. Essa velocidade depende de variáveis, tais como, taxa de expansão ou taxa de compressão da água existente dentro do aquífero. Contudo, é possível fazer alguns testes de campo para verificar o grau de confinamento (*specific yield*) de um dado aquífero.

A quantidade de água de um aquífero pode ser expressa através de três variáveis distintas: capacidade de estocagem (E), capacidade específica de estocagem ( $E_s$ ) e produção específica ( $P_s$ ).

Em um aquífero confinado, temos a seguinte igualdade:

$$E = E_s \cdot b \quad [1]$$

Onde b é a espessura do aquífero

Em um aquífero não confinado, temos a igualdade

$$E = P_s \quad [2]$$



A capacidade de estocagem de um aquífero (E) pode ser entendida como o volume de água liberado pelo aquífero expresso em relação ao volume total do aquífero. Trata-se de uma medida adimensional que varia entre zero e a porosidade específica do aquífero. Os aquíferos confinados possuem, em geral, valores bem baixos de E.

Aquíferos confinados (1) possuem valores de E que variam entre  $10^{-2}$  e  $10^{-5}$ . Os aquíferos não confinados (2) possuem essa taxa muito maior, geralmente acima de  $10^{-2}$ , que corresponde a 1,0% do volume bruto de água no aquífero.

Os aquíferos não confinados são capazes, portanto, de liberar a água contida no seu interior por drenagem direta (que depende do tamanho dos poros do material que compõe o aquífero), em grandes quantidades, sendo assim facilmente exauridos em caso de exploração acima de sua capacidade de suporte.

Os aquíferos ocorrem tipicamente em zonas saturadas que permitem uma melhor exploração econômica da água. Os "aquitardos" são zonas caracterizadas por impedir o fluxo de água de um aquífero para outro. Quando essas estruturas são completamente impermeáveis à água temos um "aquiclude" ou "aquifúgio".

A água pode subir acima do lençol freático por capilaridade saturando, às vezes, espaços acima do lençol. A esse processo dá-se o nome de "subida capilar" da água. Esse processo é dependente da

natureza dos solos. Em solos arenosos, essa capilaridade é muito menor do que em solos argilosos, uma vez que, nestes últimos, o tamanho dos poros é muito menor, o que permite uma maior ação das forças adesivas das partículas do solo sobre a água. A água pode subir por esse mecanismo de 0,2 a 10,0 metros, dependendo do solo da região.

Os aquíferos podem ser isotrópicos ou anisotrópicos. Quando o fluxo de água dentro do aquífero ( $K$ ) ocorre de modo homogêneo em todas as direções, temos um aquífero isotrópico. O fluxo de água dentro de um aquífero tem duas componentes: horizontal ( $K_h$ ) e vertical ( $K_v$ ). Aquíferos semiconfinados geralmente são anisotrópicos com valores muito diferenciados de  $K_h$  e  $K_v$ . Essas variáveis são importantes no desenho e posicionamento dos poços e, muitas vezes, não são levadas em consideração, o que prejudica em muito a performance dos poços.

Em áreas montanhosas ou próximas aos rios, os principais aquíferos ocorrem em depósitos aluviais compostos de camadas horizontais de material sedimentar não consolidado normalmente camadas alternadas de material fino e grosso. Nessas áreas, ocorre, normalmente, a recarga dos aquíferos (Fig. 8.2).

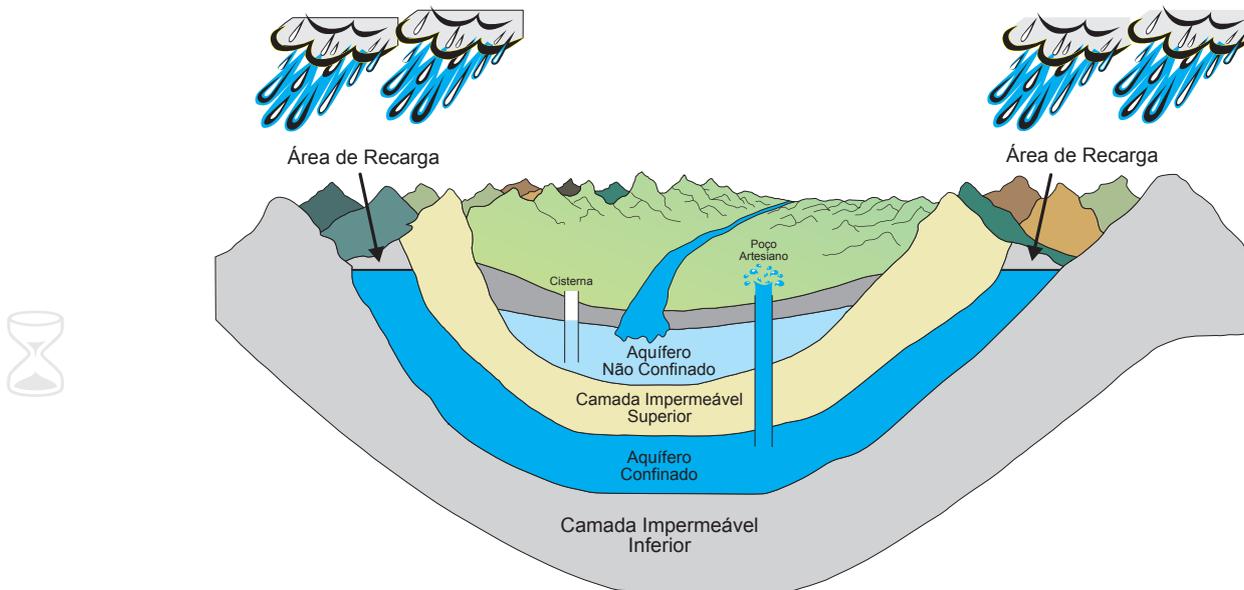


Figura 8.2 – Relações entre os aquíferos não confinados e os aquíferos confinados que podem ter a sua zona de recarga próxima ou em zonas montanhosas ou em encostas de elevações de planície para planalto.

Normalmente, as camadas mais finas estão mais distantes dos cursos d'água, enquanto as camadas de material mais grosso estão mais próximas dos rios, e também podem estar conectadas com fontes de água e nascentes, ou seja, há uma comunicação hidráulica com a superfície, já que essas camadas geralmente não conseguem ficar confinadas.

Os aquíferos podem ocorrer a várias profundidades. Aquíferos localizados a profundidades menores são mais facilmente usados pelo homem e têm uma velocidade de recarga muito maior. Em áreas desérticas e montanhosas, é comum ocorrerem aquíferos em leito de arenito. Esses aquíferos têm sido usados há séculos pelo homem nas montanhas Atlas no norte da África, em áreas montanhosas do Oriente Médio e nas montanhas de Jebel em Omã. Também estão presentes, por exemplo, na Sierra Nevada, no Estado do Novo México (EUA). Esses tipos de aquíferos rasos podem facilmente ser explorados e sua capacidade de recarga é insuficiente para mantê-los. Em decorrência, ocorre um abaixamento do lençol freático e, se os aquíferos estão próximos à costa, há a subsequente entrada de água salgada e o aquífero torna-se impréstável ao uso. Isso foi o que ocorreu em vastas áreas em Omã e na Líbia também. Os aquíferos rasos podem ser facilmente contaminados por fertilizantes, agrotóxicos e outros poluentes, advindos do intenso uso do solo pelo homem. O estudo dos aquíferos, isto é, a sua dinâmica, o seu fluxo

e a sua qualidade de água é objeto de uma ciência, a Hidrogeologia.

Deve-se aqui distinguir os aquíferos dos depósitos de água corrente subterrânea, os rios e mesmo pequenos lagos subterrâneos, comuns em áreas calcárias ou em grandes frestas ou fissuras existentes na crosta terrestre. Essas estruturas estão em geral associadas às cavernas e podem formar grandes coleções de água em contato direto ou não com as águas superficiais. Esses corpos de água não devem ser tratados como aquíferos *sensu strictu*. São áreas especiais passíveis de ser conservadas dada a riqueza da biota ou a grande beleza cênica que apresentam.

## 8.1 - Principais Aquíferos do Mundo

Existem aquíferos em quase todas as partes do mundo (Fig. 8.3). Entretanto, em muitos casos, estão sendo seriamente ameaçados pelas atividades humanas. Isso é particularmente verdadeiro para os aquíferos rasos que contêm água doce, são recarregados pelas águas das chuvas e localizam-se próximos aos oceanos. Em muitos casos, tem sido relatada a perda total do aquífero por causa de uma intrusão irreversível de água salina. Em outros casos, o bombeamento excessivo faz com que os aquíferos se contaminem com metais e outras substâncias minerais tóxicas, tais como a contaminação com arsênio ou com nitratos.

Dentre as atividades humanas que mais dependem dos aquíferos, estão o consumo humano e a irrigação. Muitas cidades de todos os tamanhos, em todo o mundo e inclusive no caso brasileiro, têm o seu principal suprimento de água a partir de aquíferos. Tanto aquíferos confinados, quanto os não confinados têm sido usados em escalas crescentes pelo homem. Entretanto, o uso de aquíferos confinados situados a profundidades maiores confere uma maior proteção contra os agentes contaminantes provenientes das diferentes atividades humanas.

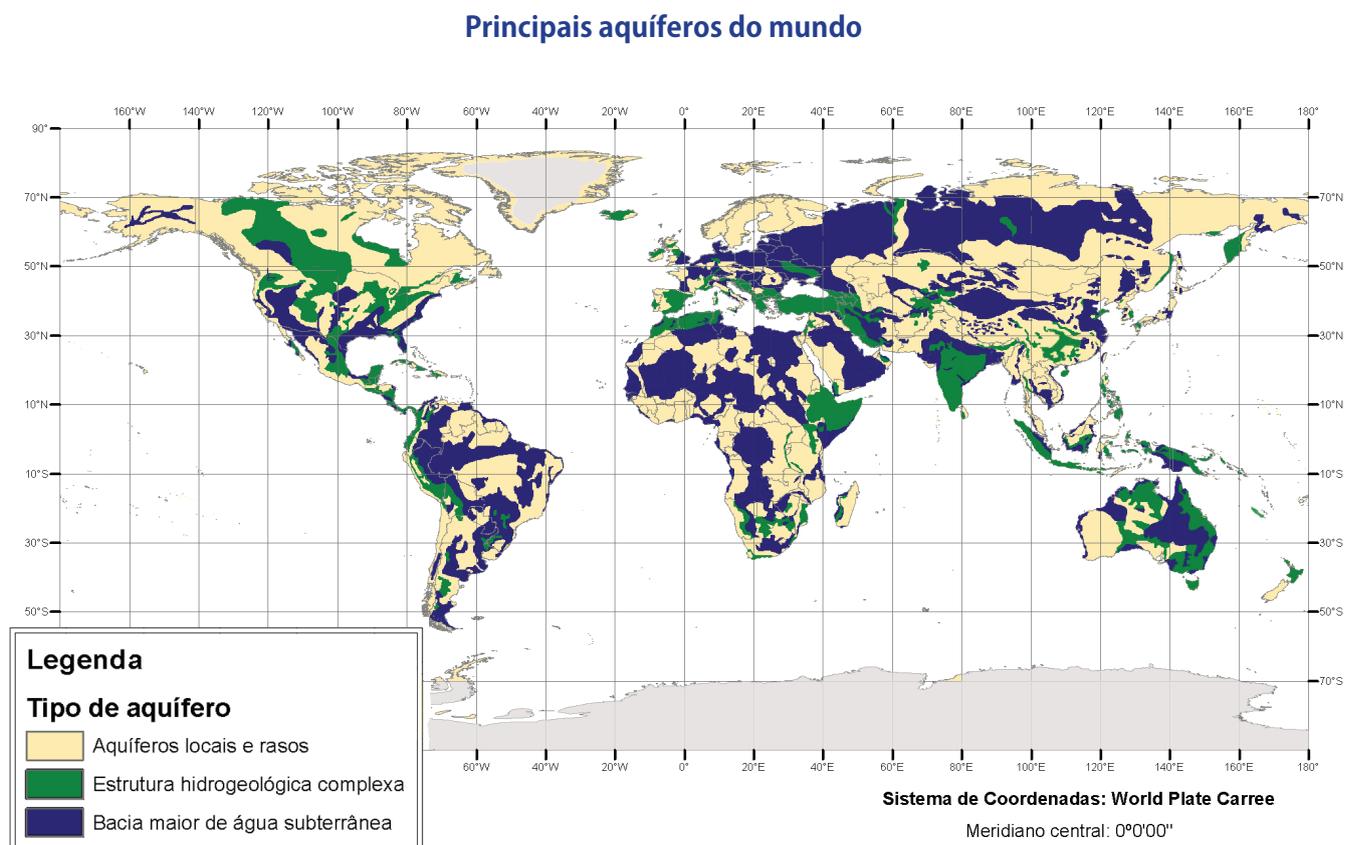


Figura 8.3 – Principais aquíferos do mundo com sua tipificação em aquíferos rasos e de importância local; grandes bacias regionais e aquíferos com estrutura hidrogeológica complexa. Fonte: UNESCO, PHI.

Em 2013, foram descobertos aquíferos de grandes proporções na África, Austrália, China e também na América do Norte. Esses aquíferos possuem, no conjunto, um volume de 500.000 km<sup>3</sup> e foram formados na última era glacial.

O aquífero da grande bacia artesianiana na Austrália é, provavelmente, o maior do mundo (área ocupada de 1,7 milhão de km<sup>2</sup>). As águas desse aquífero são fornecidas a várias cidades da Província de *Queensland*, bem como para regiões remotas da Austrália austral.

O Aquífero Guarani estende-se do norte da Argentina a sudeste e centro-oeste do Brasil e cobre vastas áreas do Paraguai (Fig. 8.4). Trata-se igualmente de um dos maiores aquíferos do mundo e cobre uma área de aproximadamente 1,2 milhão de km<sup>2</sup>. O volume de água acumulado nesse aquífero sul-americano chega a 40.000 km<sup>3</sup>, com espessuras que variam entre 50 e 800 metros e uma profundidade máxima de 1.800 metros.

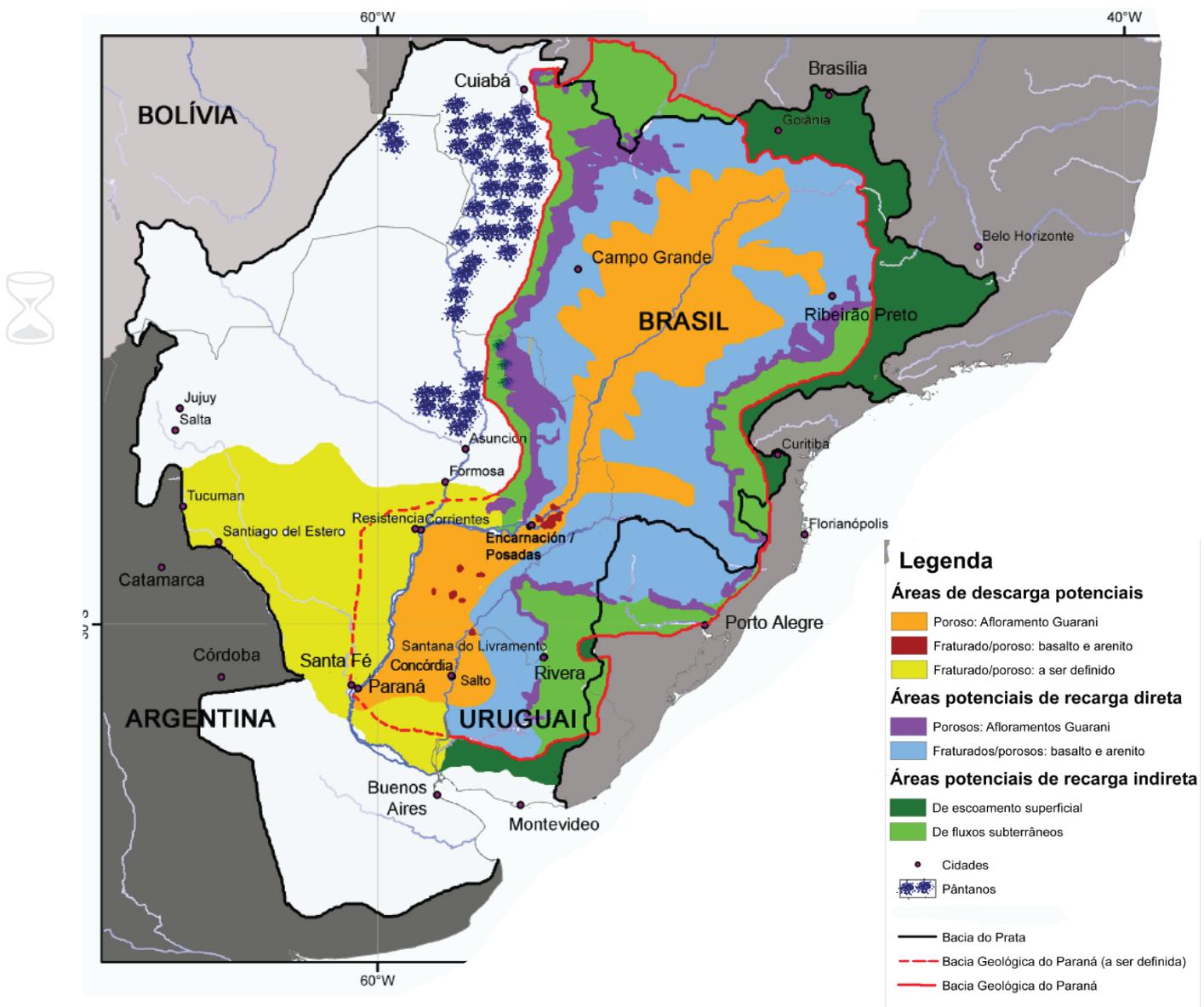


Figura 8.4 – Aquífero Guarani ocupa extensas áreas no Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina. Fonte: UNESCO/WWDR#13, pg. 221 (2009).

## 8.2 - Uso global dos aquíferos

A água está sempre presente no solo e nas rochas, só que em diferentes quantidades. Muitos acreditam que a água dos aquíferos é infinita e que basta perfurar o solo e coletá-la para diferentes usos. Entretanto, essa água pode não ser água doce ou água com uma boa qualidade para o consumo humano.

O uso intensivo de aquíferos pode ser observado em muitos países do mundo, tais como a Índia, China, Japão, países do Oriente Médio (Turquia e Irã), países europeus (principalmente Itália e os países baixos). Nas Américas, os principais usuários dos aquíferos são os Estados Unidos, México, Peru, Argentina e as regiões Nordeste e Sudeste do Brasil, particularmente o Estado de São Paulo (Fig. 8.5).

Em virtude do grande aumento nas diversas formas de usos dos aquíferos, o Programa Hidrológico Internacional (PHI), órgão deliberativo da UNESCO adotou como uma de suas prioridades, a conservação, a recuperação e o estímulo ao uso sustentável dos aquíferos (UNESCO-PHI, 2011).

Apesar das ameaças do homem, o uso racional de aquíferos pode acelerar o desenvolvimento e promover o bem-estar a nações inteiras e, também como também ser um alvo estratégico em guerras. Um exemplo, nesse sentido, é o caso do projeto “grande rio artificial feito pelo homem” (*Great Manmade River project*) levado a cabo na Líbia. Esse projeto foi responsável por um grande surto de desenvolvimento no país e, em parte, foi destruído na guerra entre a Líbia e a Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), em março de 2011, deixando milhões de pessoas sem água (Fig. 8.6).

O desenvolvimento humano, por outro lado, tem disponibilizado novas tecnologias de gestão e conservação de aquíferos. Dentre essas técnicas, podemos citar a recarga artificial de aquíferos. Esse método consiste em uma injeção forçada de água superficial nos aquíferos que pode ser feita em tempos de chuvas abundantes, diminuindo inclusive os efeitos desastrosos das chamadas “flash floods” tão comuns em áreas áridas e semiáridas.

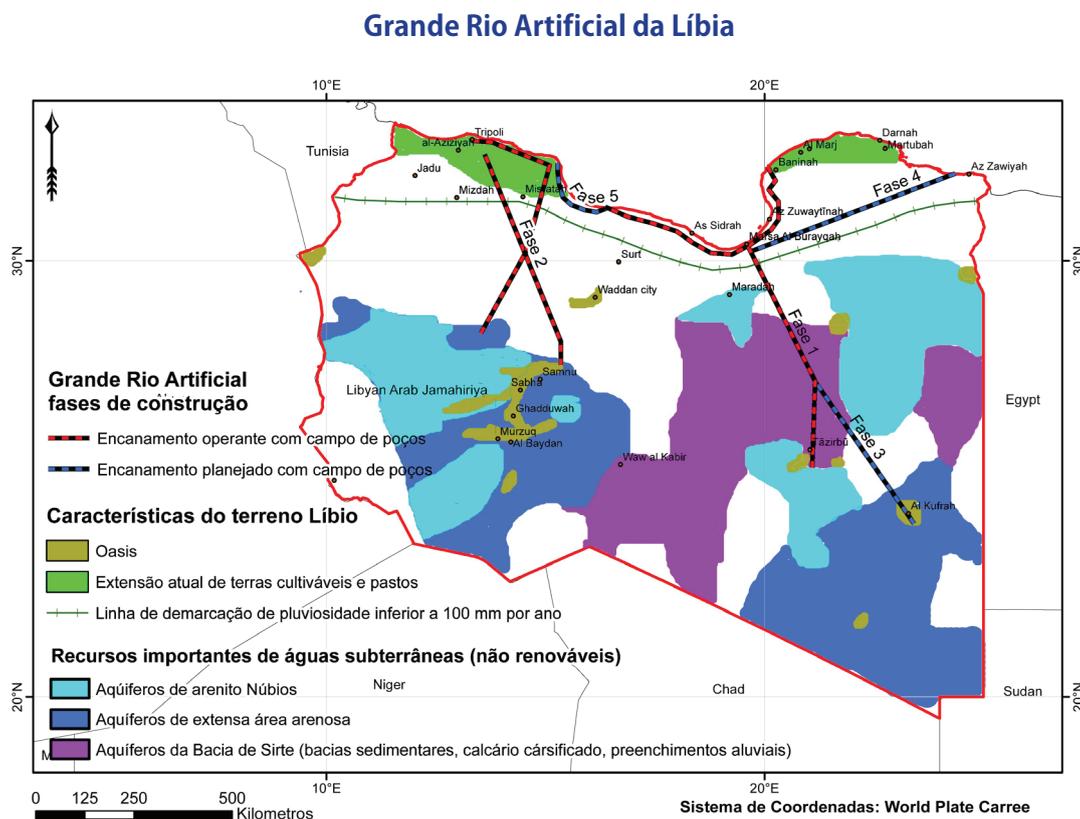
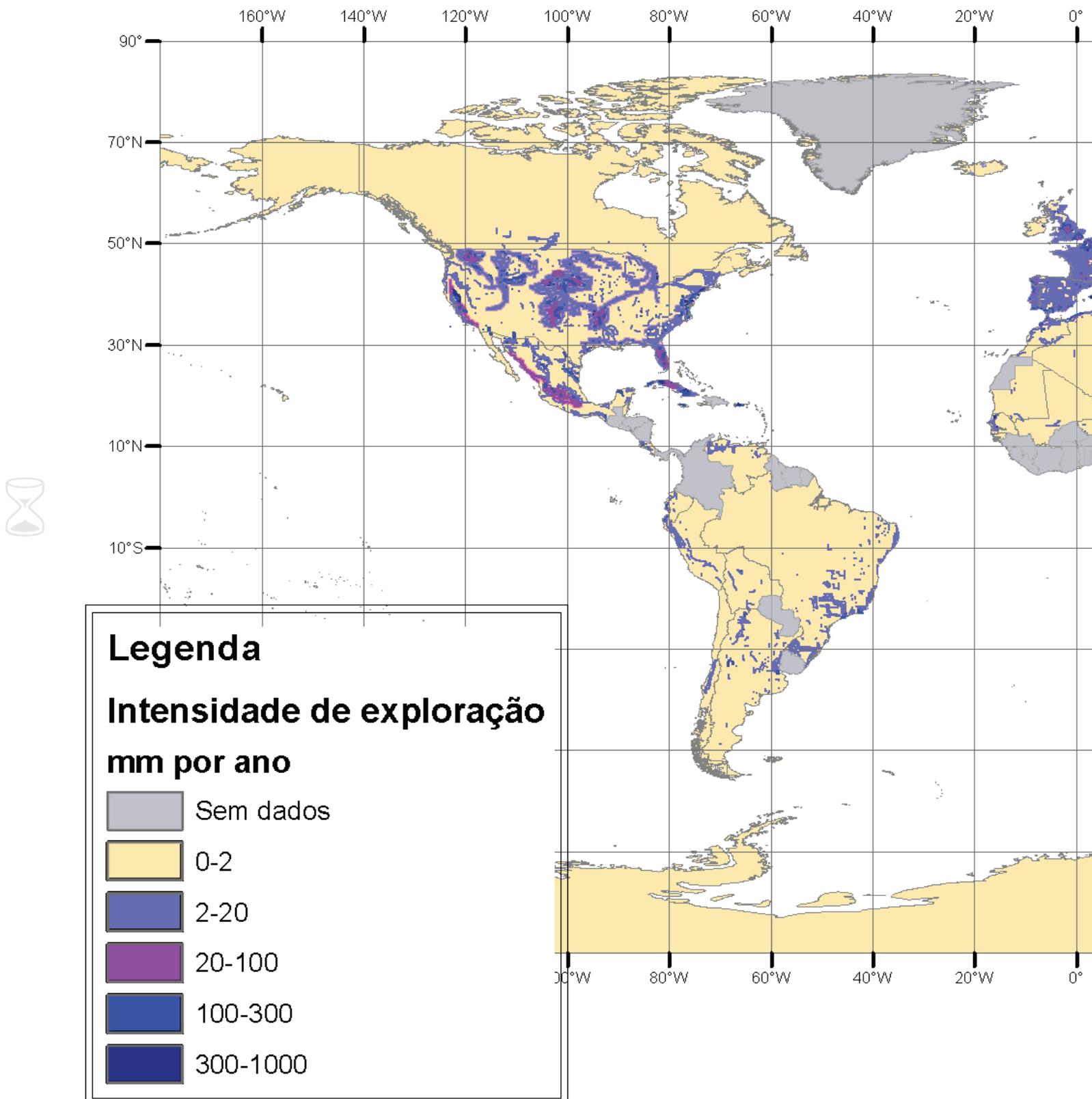
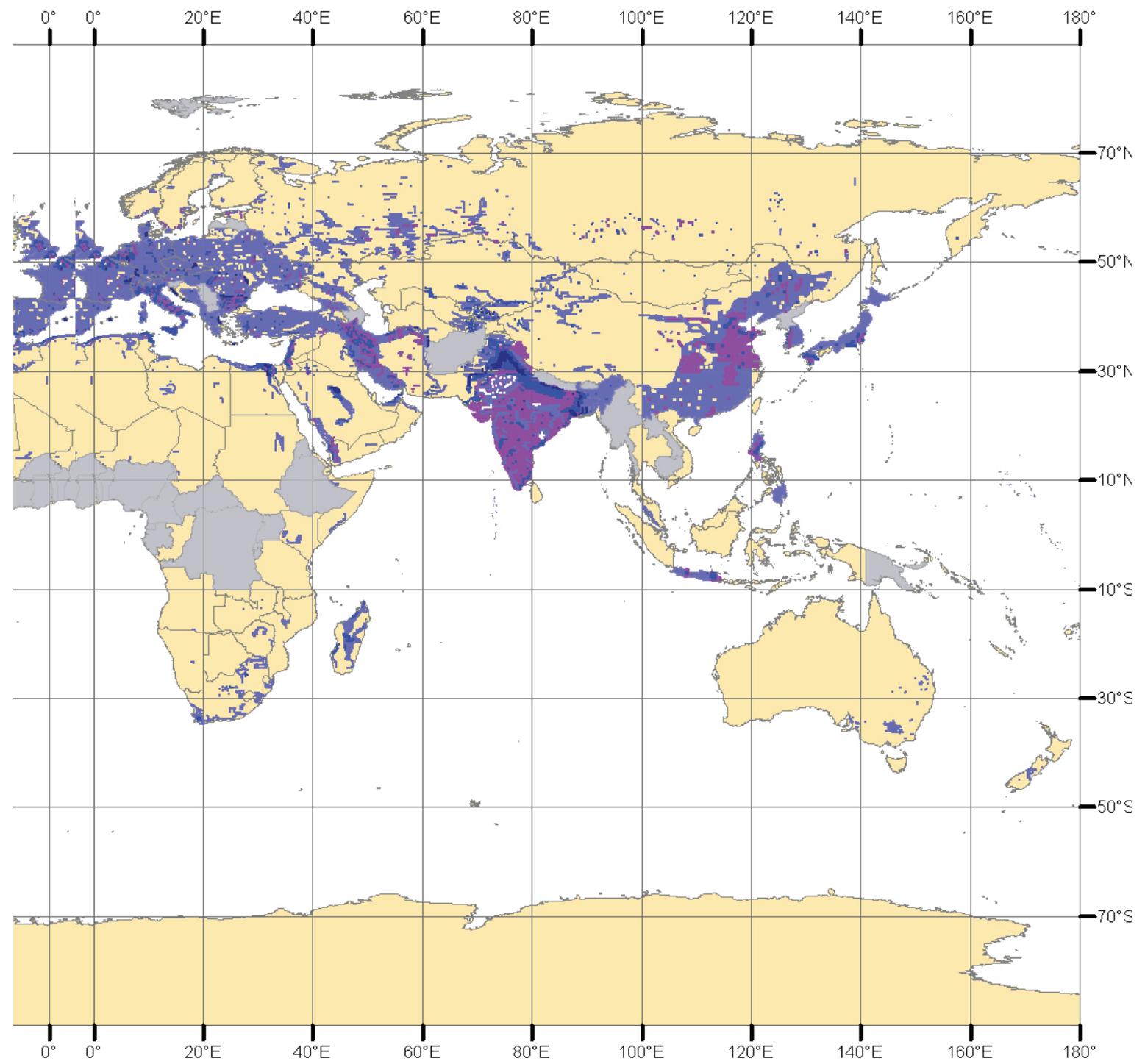


Figura 8.6 – O projeto “grande rio feito pelo homem” (*Great Manmade River Project*) existente na Líbia. A primeira fase foi inaugurada em agosto de 1991 e levou 2 milhões de metros cúbicos de água por dia para as cidades de Benghazi e Sirte. A fase 2, inaugurada uma década depois, levou mais 1 milhão de metros cúbicos para a capital Trípoli e regiões costeiras do país. As fases subsequentes (3 e 4) aumentam ainda mais a capacidade do sistema. O projeto foi parcialmente destruído na guerra com a OTAN, em março de 2011, por razões estratégicas.

## Intensidade de Exploração de Águas Subterrâneas no ano 2000





**S**

Sistema de Coordenadas: World Plate Carree

Meridiano central: 0°0'00"

## 8.3 - Casos de estudo

### 8.3.1 - Contaminação por nitratos

Um dos problemas mais comuns de qualidade de águas interiores são as elevadas concentrações de nutrientes, especialmente de nitrogênio (N) e fósforo (P). O aporte excessivo desses dois nutrientes causa o fenômeno da eutrofização em 100% dos casos (Vollenweider, 1971). Essa contaminação provém dos esgotos domésticos, dos efluentes (*run-off*) de atividades agrícolas (Fig. 8.7) e também da atmosfera que retém esses elementos seja na forma de partículas em suspensão na atmosfera (aerossóis), seja na forma dissolvida junto ao vapor de água. As queimadas, por exemplo, tão comuns nos trópicos são responsáveis pela injeção de milhares de toneladas de nutrientes, dentre estes o nitrogênio, na atmosfera todos os anos (Rocha, 2009).

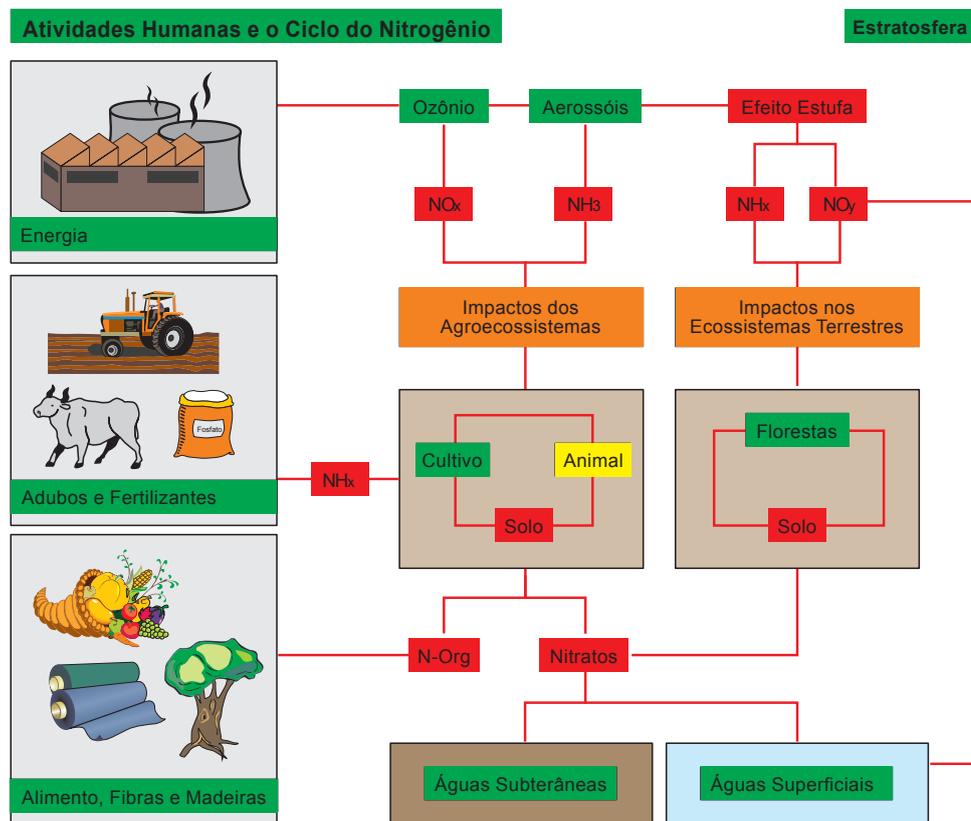


Figura 8.7 – Influência das atividades humanas no ciclo do nitrogênio. O uso intensivo de fertilizantes pode contaminar seriamente os aquíferos e também as águas superficiais. O ciclo do nitrogênio é um ciclo misto, onde parte do nitrogênio, quando não está incorporado nos seres vivos, é armazenada na atmosfera e parte, é armazenada no solo. Os nitratos tendem a se concentrar gradualmente nas águas subterâneas. O excesso dessa forma de nitrogênio inorgânico pode causar sérios problemas de saúde ao ser humano. RMPC: original.

As águas presentes nos aquíferos são extremamente suscetíveis à contaminação por diferentes agentes químicos, dentre os quais os nitratos. Essa espécie inorgânica de nitrogênio (N-NO<sub>3</sub>) está presente, por exemplo, nos fertilizantes. Esse tipo de contaminação é mais frequente, quando o lençol freático é raso e não existem camadas impermeáveis que impeçam a migração do nitrato, a partir da superfície, para camadas mais profundas. O nitrato tende a acumular-se nas águas subterâneas. Quando essas águas contaminadas dessa forma de nitrogênio inorgânico afloram junto à superfície e penetram em rios e lagos, esses ecossistemas podem ficar com teores muito elevados dessa forma de nitrogênio.

A pecuária intensiva (aves, suínos e bovinos), assim como a agricultura irrigada, estão dentre as atividades humanas que mais poluem os aquíferos com nitratos. Um destaque especial deve ser dado aos monocultivos de cana-de-açúcar. É uma prática comum a aspersão com vinhaça nesses cultivos. A vinhaça é um efluente líquido das destilarias, muito rico em minerais, tais como o potássio, fósforo,

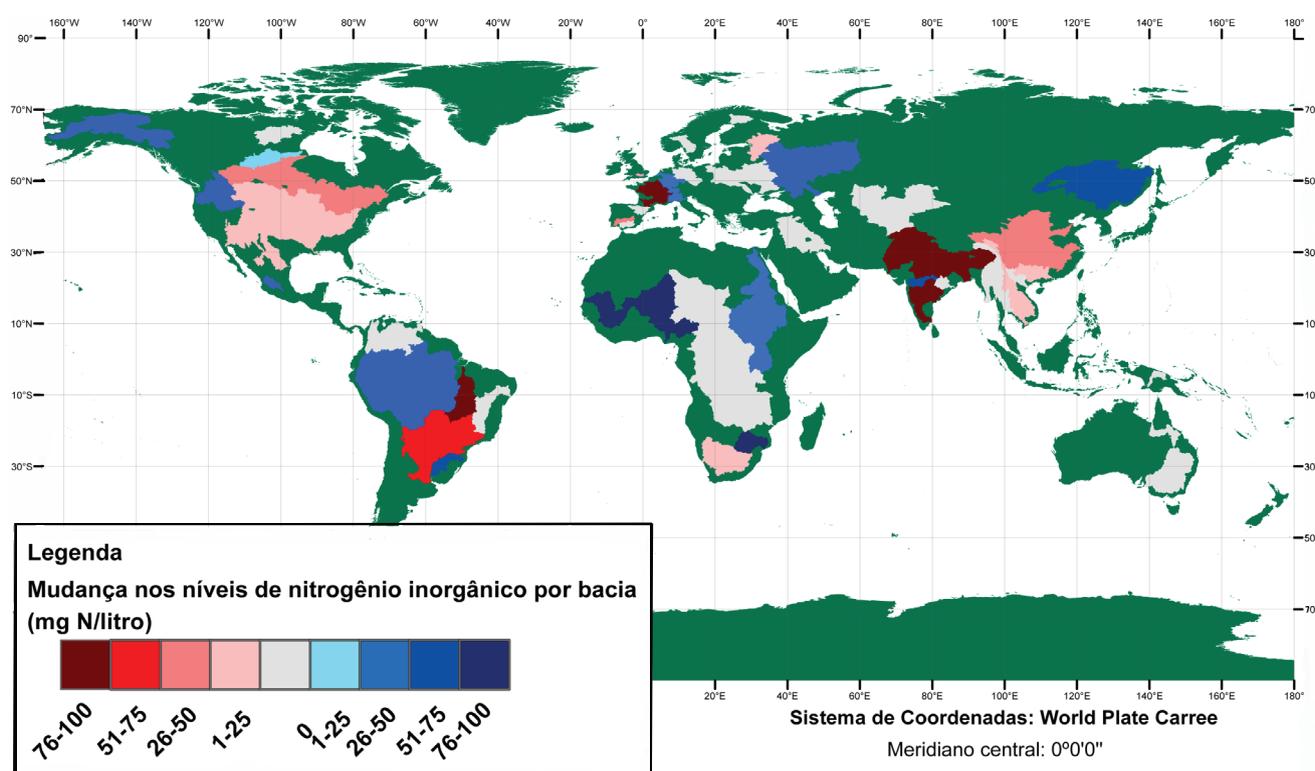
nitrogênio, e em matéria orgânica. A contaminação dos aquíferos com nitratos, provenientes da adição da vinhaça nos solos, é um dos impactos ainda pouco estudados associados ao cultivo da cana-de-açúcar (Silva et al. 2007).

Os níveis de nitrato devem ser controlados nas águas destinadas ao abastecimento humano, principalmente porque as crianças podem ser acometidas da síndrome metahemoglobinemia, ou síndrome do bebê azulado (*blue baby syndrome*) ao tomarem água com elevadas concentrações dessa forma de nitrogênio inorgânico. Pesquisas recentes têm sugerido que o consumo de água com elevadas concentrações de nitrato (> 10,0 mg/L de N-NO<sub>3</sub>) pode aumentar as taxas de aborto nas populações humanas. Outros possíveis efeitos para a saúde, associados ao consumo de água com elevados teores de nitrato, são: câncer na tireóide, anomalias congênitas em crianças. Em adultos, esse tipo de poluição pode estar associado a vários tipos de neoplasias (câncer), especialmente no trato intestinal.

A remoção e o tratamento da contaminação das águas por nitratos são procedimentos caros e exigem aporte tecnológico mais avançado. Ferver ou filtrar a água de nada adianta. Nem mesmo, o uso de cloro ou de filtros potentes ou o uso do carvão ativado ou ozônio (que retiram boa parte dos poluentes orgânicos, por exemplo). A única forma de remover os nitratos seria por osmose reversa, uma forma cara de ultrafiltração e purificação da água. Não é por acaso, que o preço das águas minerais vendidas no comércio é em geral proporcional ao teor de nitratos presentes nas diferentes marcas disponíveis no mercado.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP) tem se preocupado com a crescente poluição por nitratos em algumas partes do mundo, especialmente na Europa e na Índia (Fig. 8.8). No Brasil, existem poucos estudos sobre o aumento dos níveis de nitratos em rios e reservatórios afetados por atividades agro-pecuárias, mas as pesquisas do LGAR da UFMG sugerem que o problema já existe em vários reservatórios e rios do País e poderá tornar-se ainda mais grave em poucos anos (Pinto-Coelho et al. 2012; Pinto-Coelho et al. 2013).

### Níveis de Nitrogênio Inorgânico (Nitrito + Nitrato) por bacia. (1979-1990 e 1991-2005)



Os tons em azul significam decréscimo e os tons em vermelho significam acréscimo das concentrações de nitrato nas bacias hidrográficas indicadas

Figura 8.8 – Poluição por nitratos nas principais bacias hidrográficas do mundo. Dados da UNEP-GEMS (2006). Modificado segundo a Figura 8.3, página 371 de UNEP-GEO-4 (2007), Figura 5.2, página 175, de UNESCO, 2006, UNEP/GEMS (2006) e Galloway et al. 2003.

### 8.3.2 - A perfuração de poços (terrestres) de petróleo e a contaminação de aquíferos

O aquífero de Ogallala situa-se na porção central dos Estados Unidos e é considerado um dos maiores do mundo. Estende-se por oito diferentes estados da federação norte-americana e é formado basicamente por "água fóssil", oriunda do último período de glaciação. Esse aquífero, no entanto, tem sofrido muito com o uso intensivo, tanto para abastecimento doméstico quanto para a irrigação, ou seja, por usos diretos promovidos pelo homem. Nas áreas menos úmidas desse aquífero, a taxa de recarga anual é inferior a 10% dos usos humanos. Dados recentes (2013), fornecidos pelo Serviço Geológico dos EUA (USGS), indicam que a depleção observada nesse aquífero entre os anos de 2001-2008 igualou a 32% da depleção observada em todo o século XX. A depleção de aquíferos é, aliás, um problema global e uma das evidências mais fortes que atestam a existência de uma crise mundial das águas (Konikow & Kendy, 2005). Os principais usos humanos nesse aquífero são: a extração de água para ser usada na irrigação e na extração e beneficiamento de carvão e petróleo.

A perfuração e a exploração de óleo e gás natural a partir de poços em terra firme nos EUA requerem o bombeamento de milhares de metros cúbicos de água com inúmeros aditivos químicos nos poços, em um processo conhecido como "*fracking*". Ao contrário do Brasil, onde a produção de petróleo concentra-se na plataforma continental, a grande maioria dos países produtores de petróleo e gás explora a maior parte do petróleo e do gás a partir de poços localizados em terra firme (Fig. 8.9).

#### Produção de petróleo e gás natural nos Estados Unidos

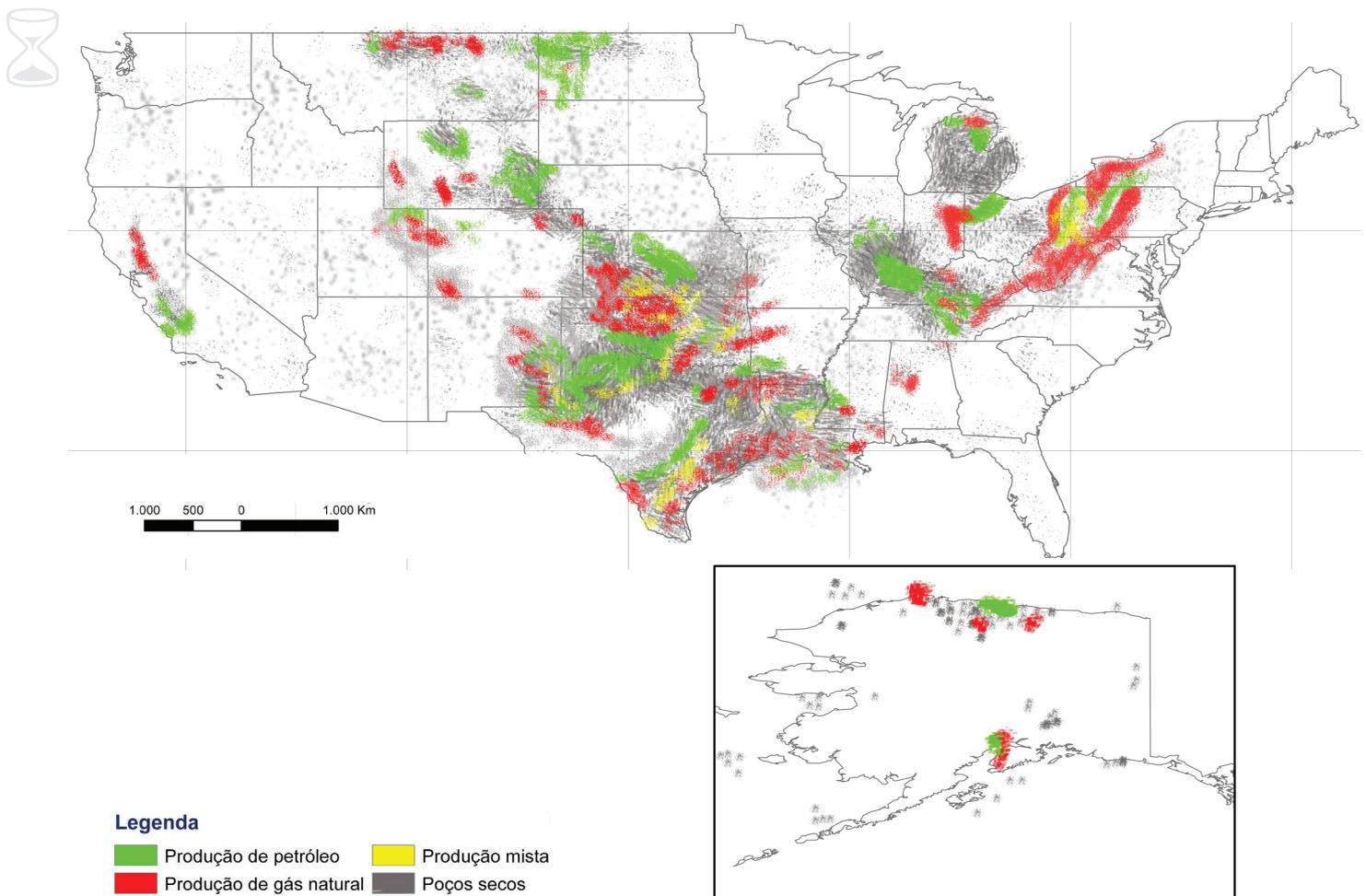


Fig. 8.9

### Zonas potencialmente contaminadas com produtos tóxicos

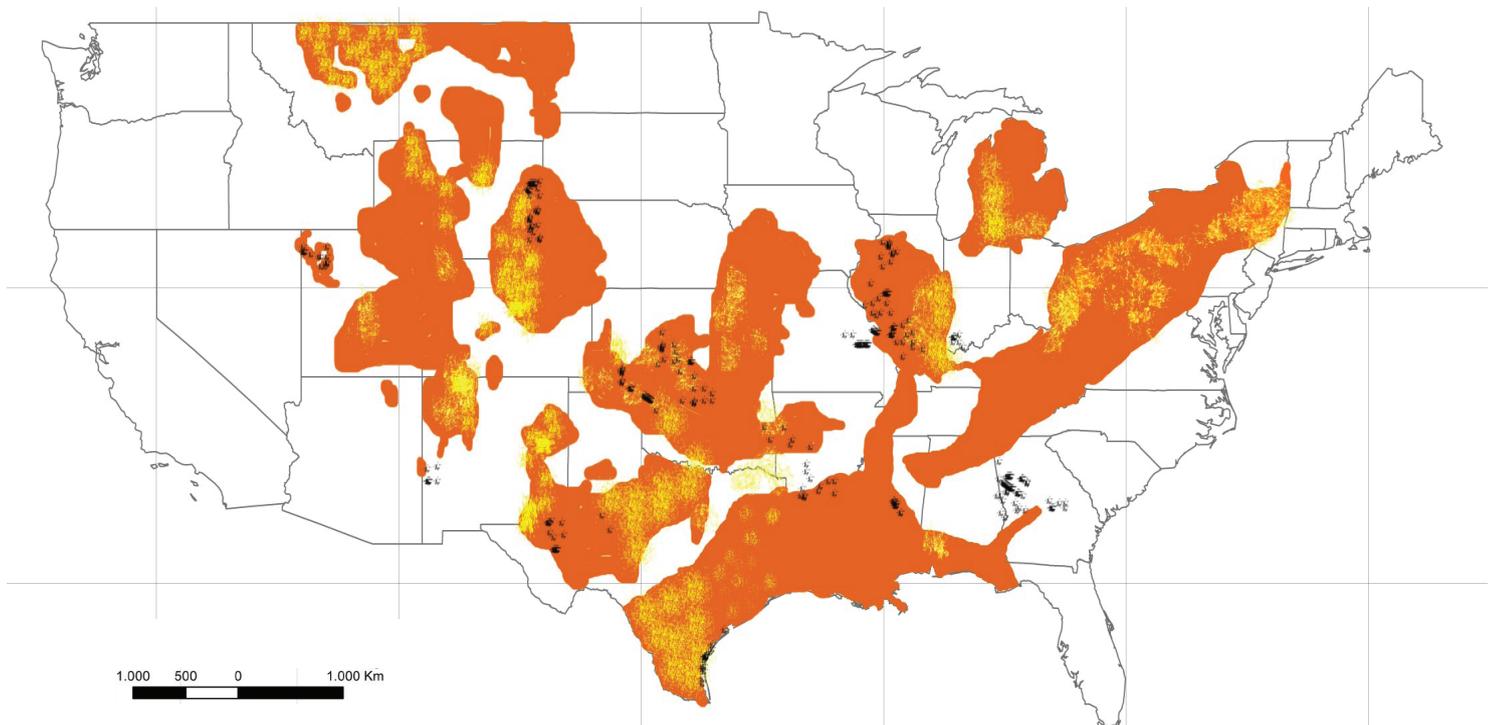


Figura 8.9 (cont.) – Relação entre a produção de óleo e gás e a contaminação de águas subterrâneas nos EUA. No mapa superior estão os locais de produção de óleo (verde) e de gás (vermelho). Abaixo, um cartograma com as zonas potencialmente contaminadas com produtos tóxicos advindos da perfuração de poços pela metodologia “fracking”. (Fontes: EIA, 2014; Mooney, 2011).

Segundo a agência de notícias americana *Associated Press*, essa prática tem levado à grande contaminação dos aquíferos em alguns estados americanos (Pennsylvania, Ohio, West Virginia e Texas). Representantes da indústria petrolífera e de produção de gás natural argumentam que apenas um pequeno percentual de poços está realmente contaminado. E mesmo assim, não se pode afirmar com certeza de que essa contaminação é proveniente do *fracking*. De toda forma, a poluição dos aquíferos causada pelo *fracking* é um tema polêmico nos EUA. Muitos cientistas e pesquisadores têm manifestado sua desconfiança em relação aos inúmeros relatórios e documentos publicados, seja pela indústria petrolífera, seja pelo governo americano em relação ao assunto (Abrams, 2014).

## 8.4 - Desafios para a gestão sustentável de aquíferos

Nos dias atuais, existe uma tendência mundial para um grande aumento nos diversos usos humanos dos aquíferos, bem como nos diferentes impactos que esses usos estão causando (Tab. 8.1). Poços secos, aumento da salinização, diminuição da capacidade de recarga, instabilidade dos solos são alguns desses impactos.

Tabela 8.1 – Usos humanos das águas subterrâneas e os seus impactos na saúde, segurança alimentar e suas implicações socioeconômicas.

Mudanças de Estado	Impactos	Saúde	Segurança Alimentar	Segurança Física	Sócio-economia
Níveis e qualidade da água subterrânea	Poços secos		Queda na atividade de irrigação e na qualidade de água.		Aumento geral do preços dos alimentos. Diminuição da vida útil de poços e outras estruturas. Aumento da desigualdade de salários e rendas. Aumento dos custos de tratamento da água.
	Aumento da salinização e da poluição		Queda na qualidade de água.		
	Diminuição das descargas para recarga	Queda dos níveis de água disponível para as populações			
	Inestabilidade de solos			Possibilidades de acidentes graves.	
	Intrusões de água salina				
	Fluxo reverso	Aumento da poluição em canais e do solo.			



Os principais desafios na gestão sustentável dos aquíferos são: (a) controle e prevenção das intrusões salinas nos aquíferos; (b) monitoramento e maior controle sobre a qualidade da água nos aquíferos, especialmente no que se refere à poluição por nitratos; (c) maior controle e, em alguns casos, menor uso dos aquíferos para a irrigação; (d) identificação, construção e gestão dos reservatórios de água subterrâneos (Fig. 8.10); (e) adoção de medidas mais eficazes para gestão e proteção dos aquíferos transnacionais, tais como o Aquífero Guarani, na América do Sul.



Figura 8.10 – Barragens de águas subterrâneas (a foto ilustra uma dessas represas no sul da Tunísia) são um meio eficiente de estocar a água em aquíferos superficiais. Essa técnica permite o uso da água em atividades de pastoreio extensivo e também de alguns tipos de culturas adaptadas ao clima árido. Reproduzido a partir da Fig. 7.5, página 339, UNEP/Geo-4 (2007).