

RIOS SUBTERRÂNEOS:

Cerca de um quarto dos países do mundo enfrenta hoje problemas de abastecimento de água, o que causa inúmeros conflitos. Mesmo no Brasil, que tem uma das maiores reservas de água doce do planeta, a escassez desse recurso essencial é sentida em vários lugares, com destaque para a seca no Nordeste. Até São Paulo, a maior cidade do país, convive com o racionamento ou a simples falta de água, e já se cogitou transpor as águas do distante aquífero Guarani para abastecer a metrópole. A idéia de levar as águas de 'reservatórios' naturais subterrâneos para outras áreas pode reforçar uma noção popular incorreta: a de que essas águas 'correm' como rios dentro da terra, bastando localizá-los para resolver os problemas de escassez. O mito resulta da dificuldade de entender o que não se pode 'ver'. As águas presentes na superfície são diretamente conectadas com as do subsolo, mas essas últimas estão contidas em rochas, o que torna necessário realizar mapeamentos e estudos geológicos para otimizar seu aproveitamento e evitar contaminação por poluentes.

Celso Dal Ré Carneiro

Heraldo Cavalheiro Navajas Sampaio Campos

Departamento de Geociências Aplicadas ao Ensino,

Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp)

José Luiz Galvão de Mendonça

Escritório Técnico em Araraquara, Departamento de Águas e Energia Elétrica,

Governo do Estado de São Paulo

MITO OU REALIDADE?

Períodos de estiagem são férteis em 'soluções milagrosas' para

amenizar a escassez de água que atinge várias regiões do país. O Brasil tem uma das maiores redes hidrográficas do planeta, e só a Amazônia contém um quinto da água doce disponível no mundo, além de um terço das florestas tropicais, uma biodiversidade valiosíssima e riquezas incalculáveis no subsolo. Ampliar o conhecimento sobre nossos recursos hídricos e temas relacionados – e, sobretudo, promover a educação ambiental – são medidas importantes para o uso racional e a proteção da água que talvez seja, para o ser humano, a mais importante riqueza natural.

Além da questão histórica da seca nordestina, a falta de água já atinge muitas outras áreas do Brasil. Uma solução está na água subterrânea, acumulada em rochas permeáveis ou semipermeáveis que podem armazenar e transmitir essa substância – são os chamados aquíferos. No mundo, esses 'reservatórios' naturais de água doce só são superados pelo gigantesco volume presente nas calotas polares, geleiras e neves do alto das montanhas. A noção de abundância da água subterrânea é comum entre a população, assim como a idéia equivocada de que tais águas circulem livremente, como se fossem 'rios' sob o chão. Mesmo levando em conta o grande volume armazenado nos aquíferos, é polêmico afir-

mar que a água de boa qualidade nunca vai acabar. A qualidade desse recurso é um fator relevante, até porque águas contaminadas por substâncias químicas ou microrganismos podem provocar algumas doenças ou transmitir outras (cólera, esquistossomose etc.) e trazer prejuízos aos ambientes naturais onde circulam.

Um país que tenha suprimento seguro de água deve cuidar de suas reservas com tanta atenção quanto aqueles que sofreram conflitos devido à falta desse recurso. Deve-se sempre combater o desperdício de água, além de proteger os aquíferos e preservar sua qualidade. Essa preocupação levou o Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) a baixar, em abril deste ano, a Resolução 396, que trata da classificação das águas subterrâneas e de sua utilização segura. A classificação baseia-se em características hidrogeoquímicas e níveis de poluição e visa prevenir e controlar a poluição, protegendo a qualidade dos aquíferos. São estabelecidas cinco categorias para essas reservas, além de uma 'classe especial', reservada a aquíferos essenciais para a preservação de ecossistemas em unidades de conservação de proteção integral ou que alimentem corpos d'água superficiais também classificados como 'especiais'. Para manter a qualidade das águas, em cada categoria, a resolução determina a criação,



Figura 1. De toda a água existente na Terra (1,38 quatrilhão de km³), a água doce representa 2,8% e as águas subterrâneas apenas 0,62%

Disponibilidade, consumo e desperdício

pelos órgãos ambientais, de 'áreas de proteção de aquíferos', 'perímetros de proteção de poços de abastecimento' e 'áreas de restrição e controle do uso da água subterrânea'.

O cuidado com essas reservas deve ser constante. Por ser um recurso estratégico, o uso da água doce desperta polêmicas apaixonadas, como no caso da privatização de serviços públicos (cidades como Paris adotaram o caminho inverso – da 'desprivatização' – para que os serviços de água retornem ao controle público), do projeto de transposição de águas do rio São Francisco, no Nordeste, ou mesmo da proposta de usar o gigantesco aquífero Guarani para abastecer a cidade de São Paulo.

A água circulante, formada pelas nuvens, pela chuva e por rios e lagos, é continuamente renovada (figura 1). Em princípio, portanto, a quantidade total de água disponível não diminui, pelo menos a da parcela disponível para consumo humano. Convém distinguir, dentro do contexto deste artigo, os termos 'demanda' e 'consumo': o primeiro está ligado à idéia de 'necessidade', enquanto o segundo corresponde à de 'gasto, utilização efetiva'. Se não houve redução da disponibilidade, por que o 'precioso líquido' está se tornando mais escasso?

A explicação para a crise, segundo muitos estudiosos, está no aumento da população humana, em práticas ambientalmente inadequadas e no estilo de vida atual. Embora a tecnologia tenha expandido a capacidade humana de captar água para seu consumo, a disponibilidade relativa tornou-se crítica, devido a vários fatores. O aumento da população mundial estimula a produção agrícola e industrial,

Figura 2. O ciclo hidrológico inclui os mecanismos de transferência contínua da água, na Terra, da superfície para a atmosfera e de volta à primeira por meio das precipitações, além dos reservatórios naturais como a água dos lagos, a neve das montanhas, o gelo dos pólos e os aquíferos



elevando a demanda, e impõe uma crescente ocupação das terras, afetando a qualidade de muitos mananciais. Os padrões de consumo excessivo ampliaram de modo quase ilimitado a demanda. Finalmente, o lançamento de resíduos industriais e domésticos, sem controle, em águas correntes, contamina as reservas e dificulta seu aproveitamento.

Nas sociedades desenvolvidas, a demanda total por água cresceu seis vezes entre o início e o final do século 20. Apenas nas lavouras de todo o mundo são utilizados cerca de 2,6 trilhões de m³ de água por ano. A irrigação, a introdução de espécies de alto rendimento e o uso de fertilizantes e agrotóxicos elevaram o rendimento das culturas, mas também a exigência de água.

As estatísticas revelam que o consumo por pessoa cresce geometricamente com o aumento da renda de uma população: em média, um norte-americano consome mais de 500 litros por dia. Se cada pessoa precisa de (ou 'demanda') cerca de 110 litros de água por dia para atender às necessidades de alimentação e higiene, segundo estimativa da Organização das Nações Unidas, e se em algumas regiões do Brasil o consumo *per capita* chega a mais de 200 litros diários, isso significa que nessas regiões cada indivíduo gasta todos os dias cerca de 90 litros a mais que o necessário. Isso, em parte, não está relacionado ao aumento de renda da população, e sim ao hábito do desperdício (tomar banhos demorados, escovar os dentes com a torneira aberta, lavar calçadas e carros com mangueiras etc.) em um país que detém 12% de toda a água doce disponível no planeta.

Como disse o geólogo Luiz Fernando Scheibe, no livro *Os círculos da água* (2007), "a lógica industrial volta a se encontrar com a água, como nos começos da Revolução Industrial. E toda a produção agrícola e industrial demanda quantidades enormes de água,

que exportamos na forma dos grãos ou da carne: a produção de 1 kg de frango consome 2 mil litros de água! E assim o alumínio, a celulose e o papel. Sem contar os dejetos e os rejeitos dessas indústrias, despejados também nas águas correntes".

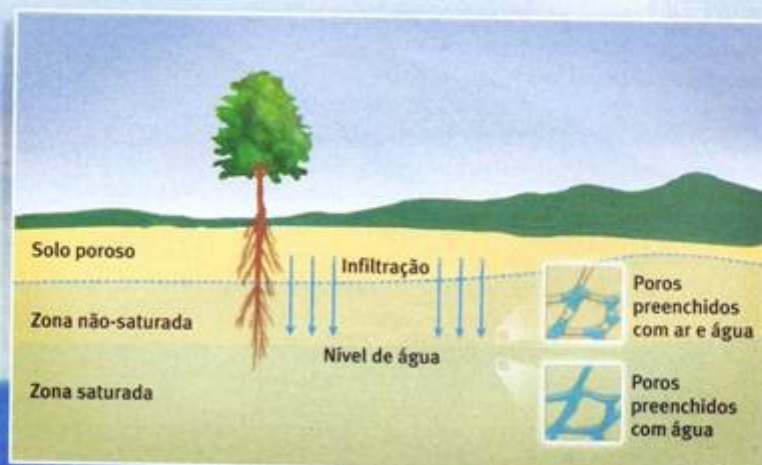
Os problemas que afetam as águas superficiais têm levado, no Brasil, a propostas de uso das reservas subterrâneas (os aquíferos) para garantir o abastecimento de grandes cidades. No entanto, a suposição de que a água superficial e a subterrânea se comportem de modo distinto, sem relação entre si – até livros escolares contêm ilustrações mostrando lagos e rios isolados sob o chão –, é incorreta. Esse mito é facilmente desmascarado quando entendemos o ciclo da água na natureza.

As águas subterrâneas

A água é encontrada, na natureza, nos três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso), e sofre continuamente mudanças de estado, associadas à constante movimentação dessa substância. A água líquida transforma-se em vapor e sobe na atmosfera, formando nuvens, dentro das quais surgem gotas ou cristais de gelo que, sob determinadas condições, precipitam-se na forma de chuva, neve ou granizo (figura 2). Uma parte forma córregos, rios e lagos, até atingir o oceano, mas outra parcela infiltra-se no solo, dependendo do tipo de rocha existente, e pode ser armazenada no subsolo, onde também se movimenta.

O solo exibe duas zonas distintas, em função da presença de água: a saturada (inferior e preenchida pela substância) e a não-saturada (superior, praticamente seca). O limite entre essas zonas, chamado de nível d'água ou 'lençol freático', tende a acompanhar, de modo 'suavizado', o relevo observado na superfície (figura 3). O nome 'zona saturada' é mais ▶

Figura 3. A água infiltra-se no solo, formando uma zona não-saturada, onde os poros não estão totalmente preenchidos, e uma zona saturada, mais profunda



adequado, já que aquíferos não são 'lençóis', mas unidades tridimensionais: têm largura, comprimento e profundidade. Esses reservatórios naturais são as águas subterrâneas, ou seja, aquelas não-retiradas pelas plantas, que são filtradas no solo e no subsolo, onde preenchem os espaços vazios existentes na estrutura de diferentes rochas.

Essas águas podem retornar naturalmente à superfície, em fontes e nascentes de rios e córregos. Também podem ser captadas por meio de poços escavados às vezes manualmente (com extração por baldes ou bombas) ou em poços tubulares feitos com equipamentos de perfuração, que podem ter dezenas, centenas ou mesmo poucos milhares de metros de profundidade.

Quando regamos uma planta, a água se infiltra devido à atração gravitacional, que 'puxa' tudo para baixo. Alguns solos e rochas são impermeáveis (ou quase) e por isso a infiltração é muito baixa ou nula. As rochas cristalinas – ígneas (geradas pela solidificação de magma, no interior da Terra, ou lava vulcânica, na superfície) ou metamórficas (geradas por transformações físicas ou químicas de outras rochas no estado sólido, sem fusão) – são maciças, mas têm fraturas internas que permitem acúmulo de água. As rochas arenosas (compostas pela sedimentação de grãos de areia) são as mais adequadas para armazenar esse recurso, pois apresentam maior porosidade (espaços vazios entre os grãos) e permeabilidade. Já os conglomerados, formados por seixos e grânulos, exibem altas taxas de porosidade e permeabilidade, graças aos espaços entre essas partículas e à comunicação entre eles. Para que um meio seja permeável, não basta ser poroso: é preciso que os vazios se intercomuniem (figura 4).

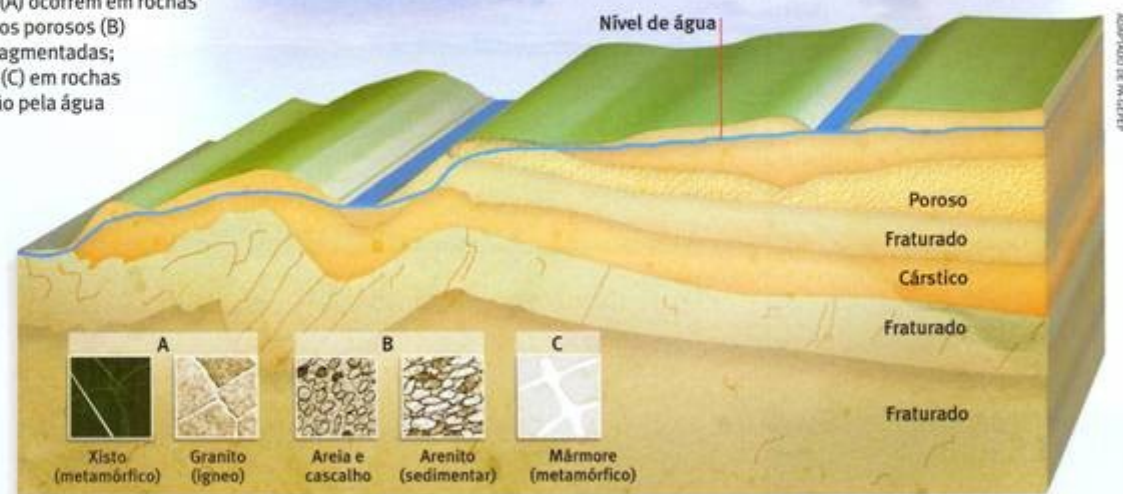
Como os diferentes tipos de rochas não ocorrem de modo uniforme em todos os locais, o acúmulo de águas subterrâneas varia de um local para outro. A variedade de rochas e de estruturas internas que as tornam capazes de armazenar água exige estudos geológicos antes da abertura de qualquer poço.

Certas rochas são mais resistentes que outras ao intemperismo (ação de fatores físicos, químicos e biológicos ao longo do tempo), que as decompõe, alterando sua estrutura e sua composição, e as transforma lentamente em solos e sedimentos. Solos formados por rochas decompostas, como o saibro, são com frequência mais porosos e permeáveis que a rocha original. Em calcários (rocha sedimentar) e mármore (metamórfica) predomina a dissolução química – a água infiltra-se por fraturas preexistentes e dissolve gradualmente o material, gerando vazios que, com o tempo, podem dar origem a amplas cavernas.

Portanto, as águas que se infiltram no subsolo não formam 'rios' subterrâneos, lagos ou 'veios d'água', como muitos imaginam, mas ficam armazenadas em rochas que apresentam as características adequadas. Esses materiais atuam como 'esponjas' no subsolo, absorvendo e acumulando água. As únicas exceções são as rochas calcárias, passíveis de dissolução pelas águas que se infiltram – apenas nelas a água se movimenta em canais descontínuos (figura 5) parecidos com rios subterrâneos.

A ocorrência de águas subterrâneas, sem importar a profundidade em que se encontrem, depende de rochas que tenham porosidade e permeabilidade. Isso derruba outra crença, a de que quanto mais profundo um poço, maior sua capacidade de produzir água.

Figura 4. Os aquíferos podem ser diferentes, dependendo do tipo de rocha que os constituem: aquíferos fraturados (A) ocorrem em rochas com fraturas; aquíferos porosos (B) em rochas já muito fragmentadas; e aquíferos cársticos (C) em rochas que sofrem dissolução pela água



Um aquífero limitado, no topo e na base, por camadas de rochas impermeáveis é chamado de 'confinado'. Se a camada superior for semipermeável, diz-se que o reservatório é semiconfinado. Nesses casos, a água fica armazenada sob pressão maior que a atmosférica. A perfuração de um poço em aquíferos desse tipo fornece uma saída para a pressão, o que 'empurra' a água em direção à superfície pelo canal perfurado. Se a água chega à superfície sem bombeamento (figura 6), o poço é denominado 'artesiano' (se for necessário bombear a água, o poço é semi-artesiano). Os aquíferos também podem ser 'livres', ou seja, ter apenas uma camada inferior limitante, sendo a parte superior aberta. Nesse caso, a pressão é insuficiente para trazer a água até a superfície.

A água subterrânea pode estar armazenada sob a superfície há anos, séculos ou até milênios. A extração pode reduzir sua quantidade, mas o recurso é 'renovável' enquanto houver reposição pela água infiltrada. A 'recarga' do aquífero depende das taxas de infiltração, do regime de chuvas na região e da vegetação. Nas cidades, a impermeabilização do solo por ruas e construções exige soluções artificiais para aumentar a recarga: algumas cidades modernas ocupam quarteirões inteiros com 'bacias de espera' para água de chuva, forradas na base com areia para aumentar a infiltração. A recarga de aquíferos é considerada até no projeto de edifícios e rodovias ultramodernos.

O aumento da demanda de água resulta, em algumas cidades, na maior utilização das reservas subterrâneas, o que nem sempre é feito do modo correto. O bombeamento excessivo e a interferência entre poços muito próximos causam o rebaixamento do nível dessa água. Em um aquífero que não apresenta grande pressão interna, a água permanece, após a perfuração e antes do bombeamento, no chamado 'nível estático'. Quando é bombeada, o nível baixa aos poucos até se estabilizar no 'nível dinâmico'. Em três dimensões, forma-se ao redor do poço, no subsolo, um 'cone de rebaixamento' do nível da água cujo tamanho depende da permeabilidade da rocha armazenadora. Em rochas menos permeáveis, a água de áreas mais distantes demora mais para fluir até os espaços deixados pela água

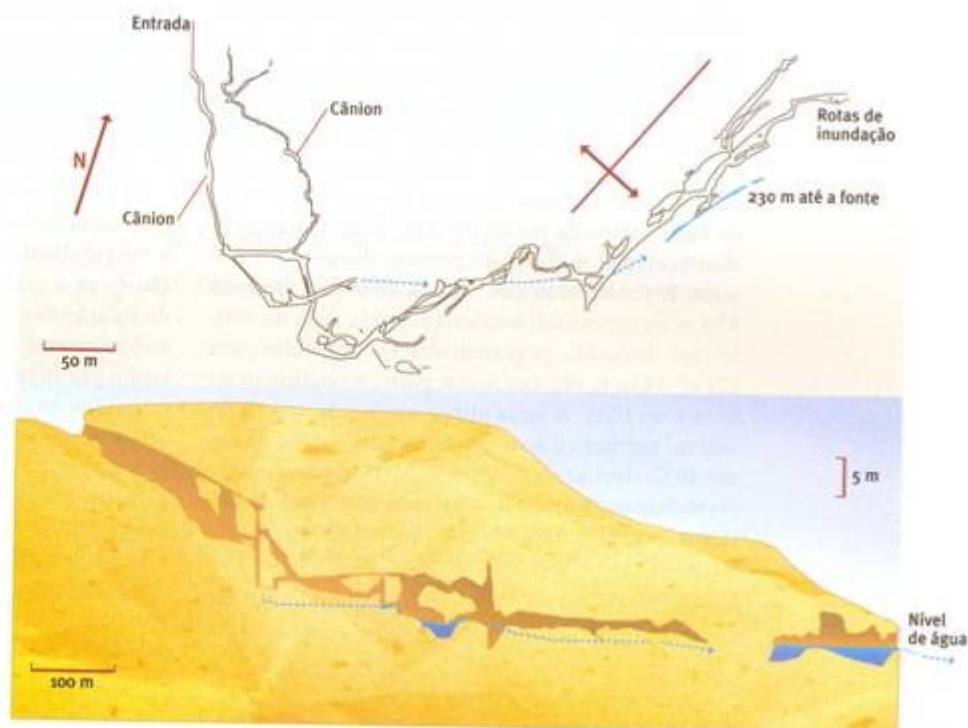


Figura 5. Mapa da caverna calcária de Onesquethaw, em Nova York, e perfil desde a entrada até a saída de água, próxima à fonte. As escalas vertical e horizontal são diferentes

extraída. Se outros poços são perfurados nas proximidades, tornando a taxa de extração maior que a de recarga, o nível da água baixa ainda mais e o aquífero tende a se esgotar.

Mananciais do Sudeste

As regiões Sudeste e Sul do Brasil, em parte localizadas sobre a formação geológica denominada bacia sedimentar do Paraná (figura 7), apresentam vários grandes aquíferos, batizados de acordo com o nome dos conjuntos de rochas (chamados de unidades litoestratigráficas) a que estão associados. Trataremos de apenas três deles.

O aquífero Bauru é aflorante, ou seja, o nível da água acompanha aproximadamente o traçado do relevo em quase toda a sua extensão, e foi formado por camadas arenosas e argilosas depositadas alternadamente, no passado, por rios. Apresenta média produtividade (inferior a 50 m³ por hora), devido à variação vertical e lateral de rochas e à pequena espessura. Já o aquífero Serra Geral, que se comporta como aquífero fraturado, é constituído por rochas vulcânicas impermeáveis e duras, formadas durante a separação entre a América do Sul e a África (ver 'Vulcões no Brasil', em CH nº 62). Onde a rocha

original está alterada ou muito fraturada, alguns poços atingem vazões entre 50 e 60 m³ por hora, mas em média sua produção é de 15 m³ por hora.

O mais importante é seguramente o aquífero Guarani, com 1,2 milhão de km², que se estende do Centro-oeste e Sudeste do Brasil ao Sul e até regiões no Paraguai, na Argentina e no Uruguai. A reserva de água, estimada em 45 mil km³, é suficiente para abastecer 150 milhões de pessoas durante 2,5 mil anos. É constituído por rochas arenosas, com até 550 m de espessura, acumuladas pela ação do vento (ver 'Botucatu: o grande deserto brasileiro', em CH nº 143), e, em sua maior parte, é confinado na base e no topo. A água atinge vazões da ordem de 500 m³ por hora e aparece, nos poços, aquecida em até 49°C, devido ao calor interno da Terra.

Na região Noroeste do estado de São Paulo, 95,5% dos municípios dependem do recurso hídrico subterrâneo para abastecimento público. Onde o aquífero é aflorante e de fácil perfuração, a intensa ex-

tração dessas águas exige controle para evitar a superação da taxa de recarga local e a contaminação. A possibilidade da contaminação dessa imensa reserva torna necessários estudos sobre a dinâmica e a vulnerabilidade de suas áreas de recarga a poluentes agrícolas e industriais e a resíduos urbanos.

A polêmica sobre a utilização do aquífero Guarani intensificou-se devido a estudos que apontam a necessidade da transposição de suas águas para abastecer a grande São Paulo. O reservatório, alvo da atenção de organismos nacionais e internacionais, é visto como o 'salvador da pátria' nesse caso. Entretanto, por se tratar de um recurso estratégico, qualquer intervenção deve ser amplamente discutida e apoiada em sólida base científica, para que o empreendimento não se torne uma nova versão do extinto Paulipetro (1979-1982), consórcio formado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e pela Companhia Energética de São Paulo (Cesp) para encontrar petróleo no território estadual. A empresa não obteve sucesso e gerou, para os cofres públicos estaduais, prejuízos superiores a US\$ 600 milhões.

Pesquisas em geociências

Os autores deste artigo são geólogos e professores que se dedicam a diferentes estudos em geociências. Celso Dal Ré Carneiro realiza pesquisas sobre uso de recursos didáticos no ensino teórico-prático de geologia e na divulgação das ciências da Terra. Heraldo C. N. Sampaio Campos e José Luiz G. de Mendonça atuam na área de hidrogeologia e na modelagem de reservatórios de água subterrânea. Os três publicaram ou participaram de livros e têm diversos trabalhos publicados em revistas científicas do Brasil e do exterior.

Um direito humano

A questão do uso dos recursos hídricos, superficiais ou subterrâneos, é tão complexa e importante que ultrapassa sistemas políticos, limites territoriais ou níveis de desenvolvimento técnico, social e econômico. Até porque as fronteiras fixadas pelas sociedades não interferem nos processos geológicos e naturais de distribuição da água na Terra. A água é um bem público e essencial para a saúde humana,

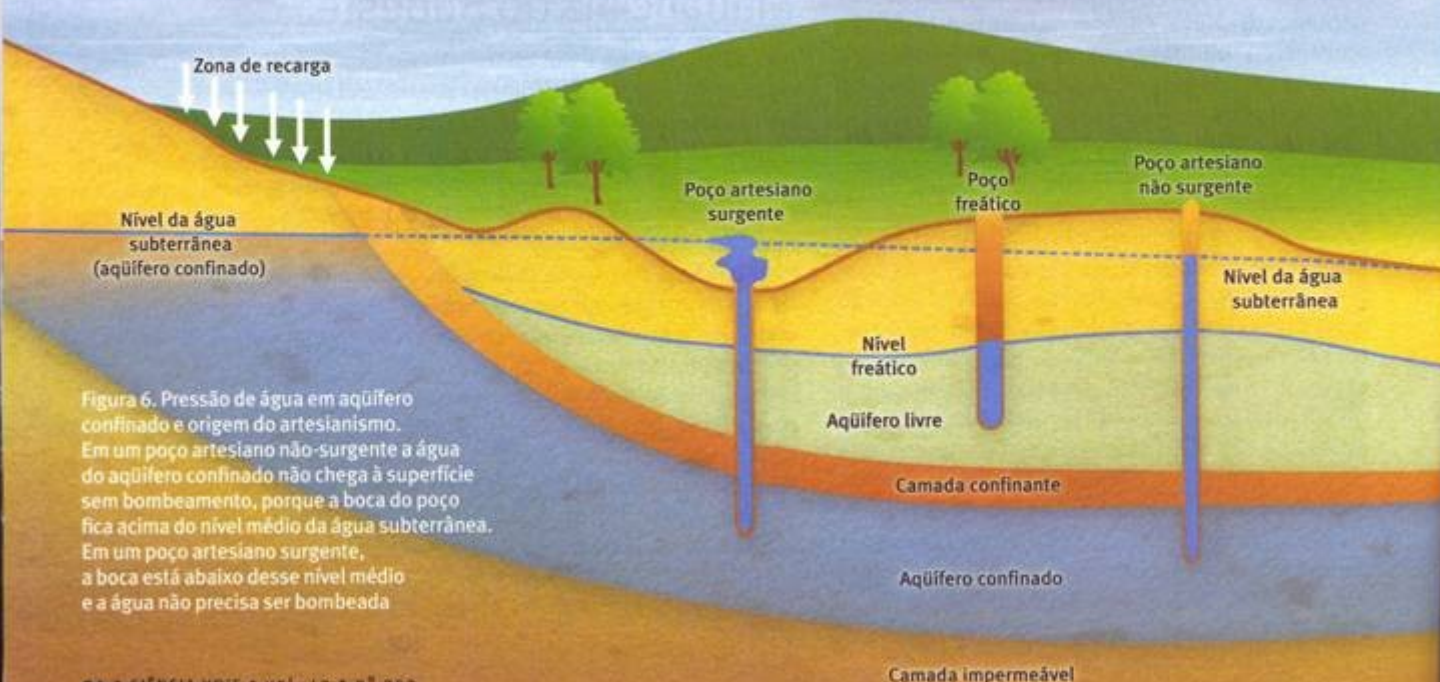


Figura 6. Pressão de água em aquífero confinado e origem do artesianismo. Em um poço artesiano não-surgente a água do aquífero confinado não chega à superfície sem bombeamento, porque a boca do poço fica acima do nível médio da água subterrânea. Em um poço artesiano surgente, a boca está abaixo desse nível médio e a água não precisa ser bombeada.



Figura 7. Corte transversal da bacia geológica do Paraná, mostrando as camadas superpostas onde estão os aquíferos Guarani (formações Pirambóia e Botucatu, em bege) e Bauru (em verde claro, mais acima) — o mapa do Sudeste e do Sul do Brasil mostra a linha desse corte da bacia e as dimensões dos aquíferos Bauru (área em verde claro), Serra Geral (área em verde escuro) e Guarani (mais profundo — área em bege, que se estende também sob as áreas em verde escuro e verde claro)

e por isso o acesso a ela é um direito da população. Como é obrigação do poder público cuidar de setores essenciais à qualidade de vida dos cidadãos (como educação, moradia e transporte), os governos devem garantir que nenhum cidadão seja privado desse recurso insubstituível, que deve ser fraternalmente compartilhado e não utilizado como mercadoria.

Uma grande preocupação atual é a adoção, em muitas áreas do mundo, de medidas que visam privatizar o abastecimento de água, que podem dificultar o acesso de parte de seus habitantes a esse recurso vital. Algumas experiências, como mencionado antes,

vêm sendo revertidas devido ao insucesso. Também é preciso considerar a importância estratégico-militar dos recursos hídricos, pois disputas em torno da água podem motivar guerras, como ocorre, por exemplo, em regiões do Oriente Médio. Ali, o controle da distribuição e utilização da água é cenário permanente de tensões e conflitos. O Brasil, mesmo tendo mais de um décimo da água doce do mundo, não pode permitir que a gestão inadequada e o desperdício gerem problemas desse tipo. A proteção é uma preocupação não menos importante, já que um aquífero contaminado estará, na prática, condenado.

SUGESTÕES PARA LEITURA

- CARNEIRO, Celso D.R. (Ed. cient.) *Geologia* (série *Ciência Hoje na Escola*, v. 10). São Paulo, Global/SBPC, 2000.
- FLEEGER, Gary M. *The geology of Pennsylvania's groundwater* (Educ. Series 3), Pennsylvania Geological Survey, 1999 (disponível em www.dcnr.state.pa.us/topogeo/education/es3.pdf).
- PA-GEPEP, Pennsylvania Groundwater Policy Education Project. *Groundwater. A prime for pennsylvanians*. League of Women Voters of Pennsylvania Citizen Education Fund (sem data).
- ROCHA, Gerônimo A. 'O grande manancial do Cone Sul', in *Estudos Avançados* (USP), v. 11(30), p. 191, 1997.
- SCHIEBE, Luiz F. *Os círculos da água*. Florianópolis, Departamento de Geociências/UFSC, 2007 (disponível em www.cfh.ufsc.br/~laam/apresentapdf.htm).
- SILVA, Rosa B. G. s.d. *Águas subterrâneas: um valioso recurso que requer proteção — Sistema Aquífero Guarani* (s/ data, disponível em www.sg-guarani.org/microsite/pages/pt/info_aguas.php)